

Diseño de un motor síncrono de imanes permanentes para la propulsión de aviones regionales

PROYECTO

presentado para optar
al Título de Grado en Ingeniería en Tecnologías
Industriales por

Ane Elosegui Capellán

bajo la supervisión de

Marco Satrústegui De Legarra

Donostia-San Sebastián, junio 2021



tecnun
Universidad
de Navarra



tecnun Universidad de Navarra

Proyecto Fin de Grado

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**DISEÑO DE UN MOTOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES PARA LA
PROPULSIÓN DE AVIONES REGIONALES**

Ane Elosegui Capellán

San Sebastián, junio de 2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Marco Satrústegui y al departamento del Vehículo Eléctrico por brindarme la oportunidad de trabajar en este proyecto y por ayudarme cuando los resultados no eran los esperados.

También se merecen una mención especial Eneko Garcia-Zamalloa, Iñigo Azkarate y Juan Linacisoro, con quienes he trabajado durante los últimos meses y con quienes he compartido muchos quebraderos de cabeza con este proyecto.

Gracias a Tecnun, por la formación que me ha ofrecido y por abrirme las puertas al mundo laboral.

Por último, a mi familia y amigos. A mis padres por la oportunidad que me han dado de estudiar en Tecnun y por el apoyo que me han prestado a lo largo de estos cuatro años; y a mis amigos de la universidad, por haber compartido tantos buenos momentos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1.	<i>Antecedentes</i>	1
1.2.	<i>Motivación</i>	2
1.3.	<i>Objetivos</i>	3
1.4.	<i>Estructura</i>	4
2.	ESTADO DEL ARTE	5
2.1.	<i>Clasificación de motores eléctricos</i>	5
2.2.	<i>Motor síncrono de imanes permanentes</i>	8
2.2.1.	Funcionamiento los motores síncronos de imanes permanentes	8
2.2.2.	Ventajas y desventajas de los motores de imanes permanentes frente a otros motores convencionales	12
2.3.	<i>Últimos avances en motores síncronos de imanes permanentes</i>	12
2.4.	<i>Alcance de la tecnología</i>	15
2.5.	<i>Imanes permanentes</i>	15
2.6.	<i>Especificaciones de diseño</i>	17
2.7.	<i>Conclusiones</i>	18
3.	DISEÑO ELECTROMAGNÉTICO	19
3.1.	<i>Selección de pares de polos y ranuras</i>	19
3.1.1.	Rango de pares de polos	19
3.1.2.	Devanado concentrado	20
3.1.3.	Configuración óptima	20
3.2.	<i>Consideraciones de diseño</i>	22
3.3.	<i>Estudio de casos</i>	25
3.3.1.	Caso 1: 8 pares de polos y 18 ranuras	25
3.3.2.	Caso 2: 10 pares de polos y 24 ranuras	32
3.3.3.	Caso 3: 14 pares de polos y 30 ranuras	34
3.3.4.	Caso 4: 14 pares de polos y 36 ranuras	35
3.3.5.	Caso 5: 16 pares de polos y 36 ranuras	37
3.3.6.	Comparación de casos y selección	38
3.4.	<i>Simulación transitoria</i>	39
3.4.1.	Pérdidas en los imanes	39
3.4.2.	Pérdidas AC en el devanado	40
4.	DISEÑO TÉRMICO	43
4.1.	<i>Sistema de refrigeración</i>	43
4.1.1.	Requerimientos térmicos	43
4.1.2.	Diseño del sistema de refrigeración	44
4.2.	<i>Cálculo acoplado</i>	46
5.	RESULTADOS	49
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	51
6.1.	<i>Conclusiones</i>	51
6.2.	<i>Trabajo a futuro</i>	52

7. PRESUPUESTO 53

8. REFERENCIAS 55

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ILUSTRACIÓN DEL WRIGHT FLYER DE 1903. FUENTE: [1]	1
FIGURA 2: GE90-115B DE GENERAL ELECTRIC. FUENTE: [3].....	1
FIGURA 3: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL AVIÓN DEL PROYECTO HIVOMOT. FUENTE: [12]	3
FIGURA 4: CLASIFICACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS. FUENTE: [14].....	5
FIGURA 5: ROTOR DE TIPO JAULA DE ARDILLA. FUENTE: [18]	6
FIGURA 6: ROTOR BOBINADO. FUENTE: [19]	6
FIGURA 7: ROTOR DE UN MOTOR DE RELUCTANCIA VARIABLE. FUENTE: [21]	6
FIGURA 8: MÁQUINA DE POLOS SALIENTES (4 POLOS). FUENTE: [22].....	7
FIGURA 9: TOPOLOGÍAS DE ROTOR DE IMANES PERMANENTES: A) IMANES EN SUPERFICIE, B) IMANES EMPOTRADOS EN ROTOR, C) IMANES TANGENCIALES ENTERRADOS, D) IMANES RADIALES ENTERRADOS, E) IMANES EN V ENTERRADOS Y F) IMANES EN V MULTICAPA ENTERRADOS. FUENTE: [24]	7
FIGURA 10: SEÑAL TRIFÁSICA	8
FIGURA 11: CAMPO MAGNÉTICO (A), SU RESULTANTE (B) Y LOS POLOS MAGNÉTICOS (C) EN ÁNGULO 90°. CASO: TRES FASES Y DOS POLOS.....	9
FIGURA 12: CAMPO MAGNÉTICO, SU RESULTANTE Y LOS POLOS MAGNÉTICOS EN A) 90°, B) 120° Y C) 150° ...	10
FIGURA 13: CAMPO MAGNÉTICO RESULTANTE Y ALINEACIÓN DE LOS POLOS DEL ROTOR Y DEL ESTATOR EN EL CASO DE 2 POLOS	11
FIGURA 14: CAMPO MAGNÉTICO RESULTANTE Y ALINEACIÓN DE LOS POLOS DEL ROTOR Y DEL ESTATOR EN EL CASO DE 4 POLOS	11
FIGURA 15: AVIÓN 100% ELÉCTRICO EXTRA 330LE	13
FIGURA 16: AVIÓN DE PRUEBAS DEL PROYECTO E-FAN X Y DE HIVOMOT. FUENTE: [12]	13
FIGURA 17: HAVILLAND CANADA DHC-2 BEAVER	14
FIGURA 18: CESSNA CARAVAN. FUENTE: [31]	14
FIGURA 19: PRODUCTO DE ENERGÍA DE DIVERSOS MATERIALES EN LOS ÚLTIMOS 100 AÑOS. FUENTE: [34]	16
FIGURA 20: FACTORES DE DEVANADO PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE POLOS (P) Y RANURAS (Qs). FUENTE: [37]	20
FIGURA 21: CURVA BH DE M235-35A. FUENTE: [41]	24
FIGURA 22: GEOMETRÍA RADIAL DEL MOTOR PRELIMINAR DE 8 PARES Y 18 RANURAS	25
FIGURA 23: SIMULACIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO DEL MOTOR PRELIMINAR DE 8 PARES Y 18 RANURAS.....	26
FIGURA 24: (A) GARGANTA PARCIALMENTE ABIERTA Y (B) GARGANTA ABIERTA	26
FIGURA 25: SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA (A) CON GARGANTA PARCIALMENTE ABIERTA Y (B) GARGANTA ABIERTA	27
FIGURA 26: IMANES (A) ENCASTRADOS EN LA CHAPA Y (B) SIN ENCASTRAR EN LA CHAPA	27
FIGURA 27: RANURAS TIPO (A) "PARALLEL TOOTH" Y (B) "PARALLEL SLOT"	30
FIGURA 28: SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DEL MOTOR PRELIMINAR DE 8 PARES Y 18 RANURAS CAMBIANDO A "PARALLEL SLOT"	30
FIGURA 29: VISTA 3D DEL DISEÑO PRELIMINAR (A) Y DISEÑO FINAL (B) DEL MOTOR DE 8 PARES Y 18 RANURAS	31
FIGURA 30: DISEÑO FINAL DE LAS RANURAS DEL MOTOR DE 8 PARES Y 18 RANURAS.....	31
FIGURA 31: SIMULACIONES ELECTROMAGNÉTICAS DE LOS MOTORES DE 8 PARES Y 18 RANURAS (A) Y 10 PARES Y 24 RANURAS (B) CON LA CONFIGURACIÓN DEL MOTOR DE 8 PARES Y 18 RANURAS	32
FIGURA 32: DISEÑO FINAL DE LAS RANURAS DEL MOTOR DE 10 PARES Y 24 RANURAS.....	33
FIGURA 33: VISTA RADIAL DEL MOTOR DE 14 PARES Y 36 RANURAS	35
FIGURA 34: DISEÑO FINAL DE LAS RANURAS DEL MOTOR DE 14 PARES Y 36 RANURAS.....	36
FIGURA 35: VISTA RADIAL DEL MOTOR DE 16 PARES Y 36 RANURAS	37
FIGURA 36: COMPARACIÓN GRÁFICA DE DENSIDADES DE POTENCIA Y RENDIMIENTOS DE LOS CASOS ESTUDIADOS	39
FIGURA 37: IMANES LAMINADOS. FUENTE: [42]	40
FIGURA 38: CURVA DE DESMAGNETIZACIÓN DE LOS IMANES RECOMA 32 A DIFERENTES TEMPERATURAS (LÍNEAS ROJAS). FUENTE: [44].....	44

FIGURA 39: VISTA AXIAL DE LA MITAD SUPERIOR DEL MOTOR REFRIGERADO 45

FIGURA 40: VISTA RADIAL DE TEMPERATURAS SIGNIFICATIVAS CON EL MOTOR REFRIGERADO 46

FIGURA 41: VISTA AXIAL DE LAS TEMPERATURAS SIGNIFICATIVAS DEL DISEÑO FINAL..... 48

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES DE IMANES PERMANENTES DE LOS ÚLTIMOS AÑOS [26].....	15
TABLA 2: ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	17
TABLA 3: COMBINACIONES DE PARES DE POLOS Y NÚMEROS DE RANURAS CON FACTOR DE DEVANADO MAYORES A 0,9. RESALTADO EN VERDE: CASOS CON PERIODICIDAD ADECUADA (NÚMERO PAR MÍNIMO MAYOR QUE LA UNIDAD)	21
TABLA 4: CASOS CON FACTOR DE DEVANADO $>0,9$ Y PERIODICIDAD >1 Y PAR. RESALTADO EN VERDE: CASOS SELECCIONADOS CON NÚMERO DE RANURAS MAYOR QUE NÚMERO DE POLOS.....	22
TABLA 5: CASOS CON FACTOR DE DEVANADO $>0,9$, PERIODICIDAD >1 Y Nº DE POLOS $<Q_s$	22
TABLA 6: PARÁMETROS EN LOS QUE SE REPARA	24
TABLA 7: PARÁMETROS PRELIMINARES DEL MOTOR DE 8 PARES DE POLOS Y 18 RANURAS	29
TABLA 8: PARÁMETROS FINALES DEL MOTOR DE 8 PARES DE POLOS Y 18 RANURAS	32
TABLA 9: PARÁMETROS FINALES DEL MOTOR DE 10 PARES DE POLOS Y 24 RANURAS	34
TABLA 10: PARÁMETROS FINALES DEL MOTOR DE 14 PARES DE POLOS Y 30 RANURAS	35
TABLA 11: PARÁMETROS FINALES DEL MOTOR DE 14 PARES DE POLOS Y 36 RANURAS	36
TABLA 12: PARÁMETROS FINALES DEL MOTOR DE 16 PARES DE POLOS Y 36 RANURAS	38
TABLA 13: RESUMEN DE LOS PARÁMETROS FINALES DE LOS CASOS ESTUDIADOS	38
TABLA 14: CLASES DE AISLANTES TÉRMICOS PARA EL DEVANADO. FUENTE: [43]	43
TABLA 15: RESULTADO DEL MOTOR	49
TABLA 16: COSTES DEL SOFTWARE	53
TABLA 17: COSTES MATERIALES	53
TABLA 18: COSTES DE LA MANO DE OBRA.....	54
TABLA 19: RESUMEN DE COSTES.....	54

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo evaluar el límite de los motores eléctricos de imanes permanentes en el ámbito aeronáutico con el fin de ver si es viable sustituir un motor turbofán de un avión regional por uno de imanes permanentes.

Inicialmente, se presenta el estado del arte, clasificando los motores eléctricos y analizando el funcionamiento y la tecnología de los motores síncronos de imanes permanentes, así como sus ventajas y desventajas. Además, se analizan los diseños de los motores de imanes permanentes realizados en los últimos años y la tecnología de los imanes permanentes, con el fin de definir unas especificaciones que requeriría un motor para la aplicación antes mencionada.

Una vez presentadas las tecnologías se diseña el motor a nivel electromagnético y térmico. Para el diseño electromagnético se siguen los siguientes pasos: primero se seleccionan las combinaciones más apropiadas de pares de polos y ranuras; después se diseñan las partes activas del motor para cada una de las combinaciones seleccionadas, y por último se optimizan las topologías más prometedoras para dar cuenta de las pérdidas en los imanes y las pérdidas AC en el devanado.

Una vez realizado el diseño electromagnético, se diseña el sistema de refrigeración y se hace el cálculo térmico, donde se lleva a cabo un cálculo acoplado entre el análisis electromagnético y el térmico.

El PFG concluye con los resultados obtenidos y unas conclusiones acerca del trabajo realizado.

ABSTRACT

The objective of this project is to evaluate the limit of permanent magnet synchronous electric motors (PMSM) in aeronautic applications. More specifically, the limit of the technology is going to be evaluated when replacing a turbofan propulsion engine of a regional aircraft with a PMSM.

First, the state of the art is presented, beginning with a classification of electric motors followed by the working principle and advantages and disadvantages of PMSM. The latest advances with PMSM and permanent magnet technology is studied, with the purpose of introducing the specifications the motor will have for this application.

After presenting the technologies, the motors electromagnetic and thermal designs are made. The electromagnetic design has the following structure: first, the most suitable combination of slot and pole number is selected; then, the active parts of the motor are designed for each of the selected cases; and, finally, the most promising topologies are optimized to quantify AC losses and magnet losses.

Once the electromagnetic design is made, the cooling system is designed, and the thermal calculations are made. Then, coupled calculations of the electromagnetic and thermal designs are carried out.

Ultimately, the results obtained are presented along with the conclusions regarding the work carried out during the project.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Antecedentes

La aviación con motor comenzó en 1903 de la mano de los hermanos Wright cuando consiguieron volar durante 12 segundos y 120 metros con el Wright Flyer (ver Figura 1). Desde aquel primer vuelo hasta hoy, el sector ha evolucionado mucho, implementando nuevas tecnologías para mejorar la aviación en todos sus aspectos. Todo empezó con los 12 caballos de potencia [1] que tenía el motor de aquel primer avión de 1903 y se ha llegado, por ejemplo, hasta los motores turbofán GE90-115B (Figura 2) del Boeing 777 para pasajeros, que proporcionan hasta 115300 caballos de potencia [2]. Además, se han ido añadiendo una gran variedad de dispositivos dentro de los aviones, desde básicos y necesarios, como, luz, y controles de mando, hasta sistemas secundarios como pantallas y televisiones. La mayoría de dichos sistemas están alimentados por sistemas eléctricos. Sin embargo, la propulsión ha sido y sigue siendo de combustión.

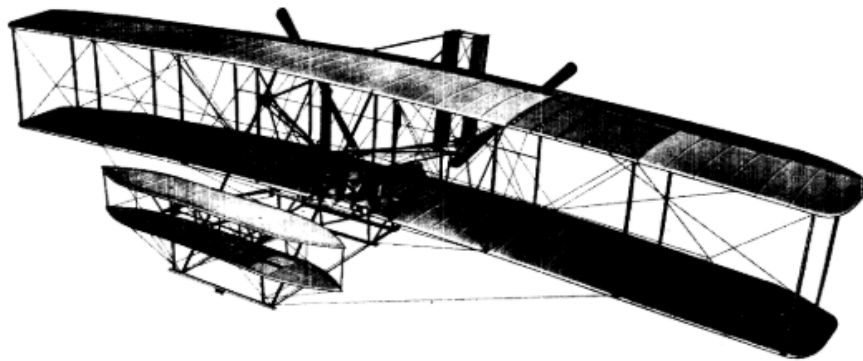


Figura 1: ilustración del Wright Flyer de 1903. Fuente: [1]



Figura 2: GE90-115B de General Electric. Fuente: [3]

Por un lado, en los últimos años, el sector de la aviación ha tenido un aumento muy notable, en gran parte, por el crecimiento de la economía, que ha llevado al incremento del turismo y a la colaboración internacional [4]. Así, el número de vuelos se ha multiplicado en las últimas décadas.

Por otro lado, la conciencia ambiental ha aumentado, y dado que la aviación es el medio de transporte más contaminante por pasajero y kilómetro [5], se están buscando formas de reducir la huella de carbono en el sector. Los motores de combustión emiten gases que agravan el efecto invernadero y perjudican la capa de ozono [6], como el dióxido de carbono (CO_2), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2), entre otros.

El 2% de las emisiones globales viene de la combustión en motores de avión. Para tener una referencia de cuánto contamina realmente un avión, la Organización de Aviación Civil Internacional ha hecho algunos cálculos que indican que las emisiones de CO_2 emitidas por un solo pasajero de Londres a Nueva York son equivalentes al 11% de las emisiones anuales de un ciudadano británico medio [7].

1.2. Motivación

La organización europea que se ocupa de la sostenibilidad del sector aeronáutico en la Unión Europea, llamada Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe o ACARE, propuso reducir las emisiones de CO_2 del sector en un 75% y las de NO_x en un 90% para 2050 [4] como solución progresiva a la emisión de gases nocivos.

Una de las formas de cumplir dichas propuestas es sustituir los motores de combustión para la propulsión por motores eléctricos. Sin embargo, la relación potencia/masa presenta una gran limitación en la aviación por los estrictos requerimientos del sector: la potencia debe ser muy elevada manteniendo el peso relativamente bajo.

Esto supone un reto para el sector, y han surgido muchos proyectos de investigación y desarrollo para la transición hacia la electrificación de los aviones. Uno de los proyectos es HIVOMOT (*High power and VOLTage operation of electric MOTors in aeronautics*), subvencionado por CleanSky 2 [8], uno de los programas que se encuentran dentro de la iniciativa Horizon 2020 [9] que financia la Unión Europea (número de referencia JTI-CS2-2020-CFP11-THT-12 [10]). En él colaboran diferentes entidades, entre las cuales se encuentran Alconza Berango SL, del grupo Irizar, Antec Magnets SLU, Suprasys y el centro de investigación Ceit, que es el coordinador de la propuesta.

El objetivo del proyecto HIVOMOT es investigar soluciones para los retos científicos y técnicos que supone implementar motores eléctricos de alta potencia y tensión en mucha altitud. Buscan máquinas fiables y seguras que no fallen en condiciones de mucha altitud, ya sea en trayectos cortos o largos, investigando a su vez la implementación de tecnología superconductora en el ámbito de los motores eléctricos. [11]

El avión objetivo del proyecto es un avión regional con cuatro motores turbofán, como se aprecia en la Figura 3. Se sustituirá uno de los cuatro motores por un motor eléctrico con

superconductores que deberá tener una densidad de potencia lo más parecida posible al motor turbofán que reemplazará. El proyecto HIVOMOT abarca tanto su estudio, como su diseño, producción y prueba, con la finalidad de introducir los superconductores para la propulsión.

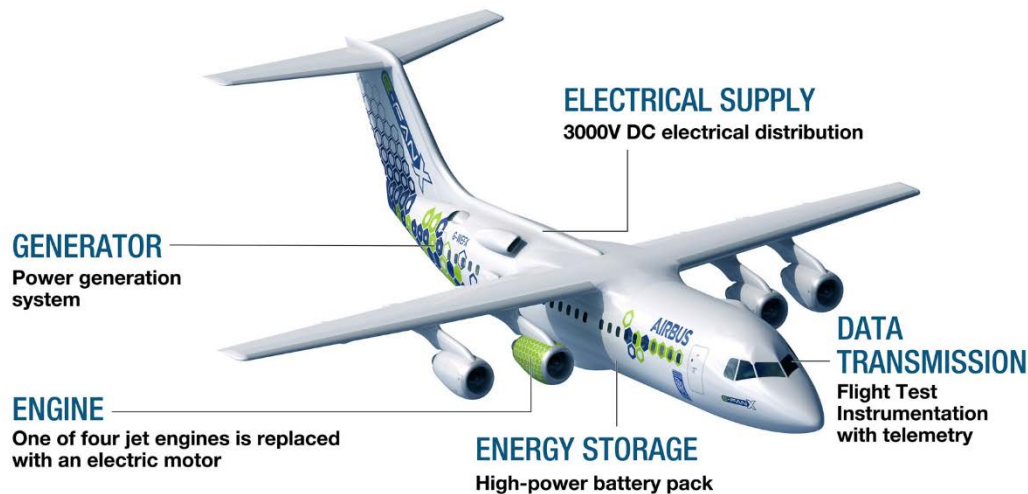


Figura 3: características principales del avión del proyecto HIVOMOT. Fuente: [12]

Este proyecto de fin de grado se ha realizado en el departamento de Vehículo Eléctrico del Ceit [13], el centro de investigación de Tecnun, Universidad de Navarra. El trabajo que aquí se muestra pretende dar respuesta a una de las tareas definidas dentro del proyecto HIVOMOT, que es estudiar los límites de los motores síncronos de imanes permanentes, en términos de densidad de potencia [kW/kg], para unas condiciones de trabajo concretas que se mostrarán más adelante.

1.3. Objetivos

Los objetivos de este proyecto de fin de grado son los siguientes:

- Realizar un estado del arte de la propulsión eléctrica en el sector aeronáutico, con especial atención en los motores de imanes permanentes
- Diseñar un motor eléctrico de imanes permanentes que cumpla los requerimientos y las especificaciones definidos por el proyecto HIVOMOT
- Diseñar la refrigeración de acuerdo con la geometría y teniendo en cuenta las restricciones que imponen los materiales
- Obtener un valor de densidad de potencia máximo que dé cuenta de la limitación de esta tecnología aplicada a la propulsión en el sector aeronáutico

1.4. Estructura

El proyecto comienza con un análisis de la tecnología en el sector. Se hará una clasificación general de motores y una comparación de los tipos de motores que se emplean en el sector de la aviación. Después se detallará el funcionamiento de los motores síncronos de imanes permanentes, ya que son los que se van a emplear en este proyecto de fin de grado.

Una vez comentado el funcionamiento, se darán algunos casos recientes de motores de imanes permanentes aplicados en diversos proyectos de aviación, y se darán a conocer algunas de sus características. También se verán las ventajas y desventajas que tienen los motores de imanes permanentes en comparación con otras topologías de motores eléctricos. Después, se hará un análisis de la tecnología de los imanes permanentes más utilizados en motores eléctricos, y se darán sus prestaciones más significativas. Por último, se presentarán los requerimientos definidos por el proyecto HIVOMOT, y las conclusiones obtenidas del estado del arte.

A continuación, se diseñará un motor eléctrico en dos etapas: una primera donde se haga un análisis electromagnético en profundidad y una segunda, donde se desarrolle el sistema de refrigeración y se evalúen las temperaturas de trabajo del motor.

El diseño electromagnético consta de tres apartados: primero, se seleccionarán las mejores combinaciones de pares de polos y ranuras, y con esto, se diseñarán las partes activas del motor. Después, incluyendo las pérdidas en los imanes y las pérdidas AC del devanado, se optimizarán los parámetros propuestos.

Para llevar a cabo el diseño térmico, en primer lugar, se diseñará el sistema de refrigeración, y después, con los cálculos acoplados que ofrece Motor-CAD, se obtendrán las temperaturas de trabajo del motor diseñado.

Finalmente, se hará una reflexión con los resultados obtenidos y se concluirá sobre esta tecnología en la aplicación aeronáutica.

También se analiza el presupuesto del proyecto de fin de grado.

2. ESTADO DEL ARTE

Este apartado está estructurado de la siguiente manera: primero se clasifican los motores eléctricos para después centrarse en los motores síncronos de imanes permanentes. Se presentan sus ventajas y desventajas, así como los últimos avances realizados con esta tecnología. También, se presentan los imanes permanentes y se dan las especificaciones del proyecto.

2.1. Clasificación de motores eléctricos

Según la alimentación que reciben, los motores eléctricos se pueden clasificar en dos grupos: los de alimentación de corriente continua (DC) y los de alimentación de corriente alterna (AC). Por un lado, los motores DC se diferencian en si tienen escobillas o no; y, por otro, los motores AC, se clasifican en síncronas y asíncronas, según si el rotor gira a la misma velocidad que el campo giratorio del estator. Y, por último, las máquinas síncronas se clasifican en tres grupos: de polos salientes, de imanes permanentes o de reluctancia.

Como se ve en la Figura 4, hay motores eléctricos de muchos tipos, cada uno con sus propiedades, y por esa misma razón no pueden usarse todos en aviación. Deben tener valores concretos de potencia/masa, velocidad y tensión de alimentación, entre otros.

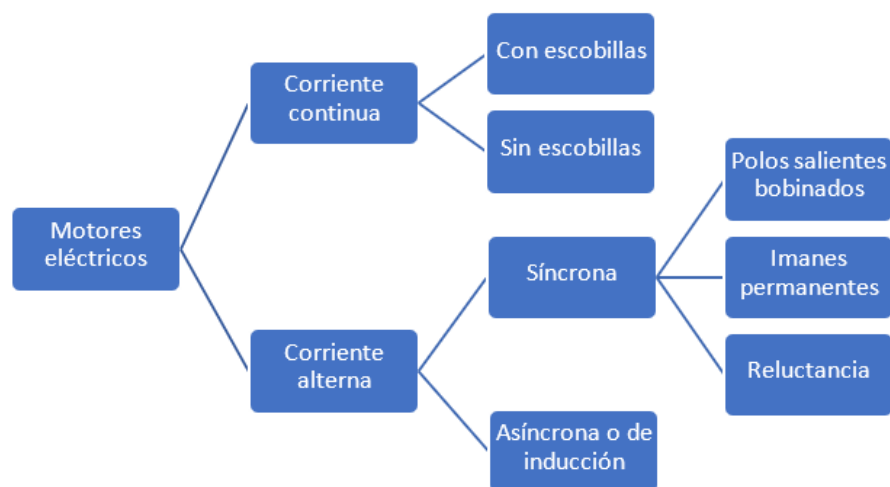


Figura 4: clasificación de motores eléctricos. Fuente: [14]

Hasta la fecha los motores más utilizados en aviación sin tripulación son los motores DC sin escobillas [15] (BLDC, de brushless direct current), pero los aviones de vuelos tripulados utilizan los siguientes [16] y [17]:

- Asíncrona o de inducción. Se valen del campo inducido en su rotor para girar. El rotor puede ser del tipo jaula de ardilla (Figura 5) o un rotor sólido (Figura 6). Su principal aplicación está en la industria ya que son reconocidos por su simplicidad, fiabilidad y por bajo precio en

comparación con los demás motores. Además, su estructura es robusta, pero el control del motor es complejo y es necesario magnetizar el rotor; esto reduce su eficiencia por debajo de la de los motores de imanes permanentes.

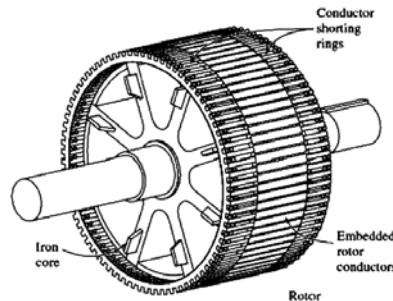


Figura 5: rotor de tipo jaula de ardilla. Fuente: [18]

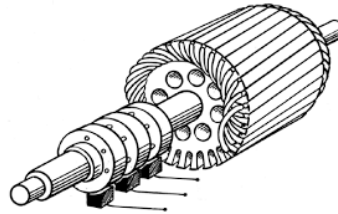


Figura 6: rotor bobinado. Fuente: [19]

- Síncrono de reluctancia variable. Estos motores se valen de la geometría del rotor para generar par, ya que el rotor intentará alinearse de forma que el campo magnético pase por los lugares donde la reluctancia sea menor, es decir por donde no haya aire, que presenta una gran reluctancia magnética (ver Figura 7). Tienen una alta densidad de potencia y son capaces de soportar grandes variaciones de temperatura y tensión mecánica porque no tienen bobinas ni imanes, que son más sensibles a esto; pero por esta misma razón necesitan altas corrientes, y eso significa mayores pérdidas, y consecuentemente menor factor de potencia [20].



Figura 7: rotor de un motor de reluctancia variable. Fuente: [21]

- Síncrono de polos salientes de rotor bobinado. Habitualmente los polos salientes tienen sus propias bobinas (ver Figura 8), alimentadas con una corriente controlada, de forma que

puede interrumpirse esa alimentación cuando sea necesario. Gracias a esto, se puede controlar su velocidad de giro en caso de sobre-velocidades, por ejemplo. Estos motores no llegan a densidades potencias tan altas como las de imanes permanentes ni a velocidades muy altas, pero tienen un factor de potencia alto y son capaces de dar mucho par a bajas velocidades.

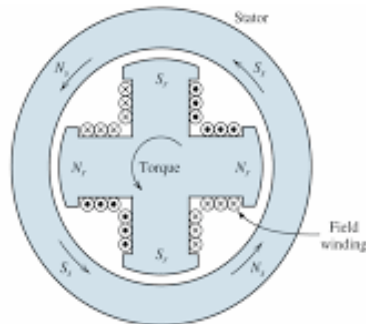


Figura 8: máquina de polos salientes (4 polos). Fuente: [22]

- Síncronos de imanes permanentes. Sus imanes (naturales o artificiales) crean un campo magnético muy fuerte y permiten que el flujo en el entrehierro sea alto y que las pérdidas en el cobre sean bajas, pero limitan la temperatura máxima que pueden soportar, ya que se desmagnetizan con temperaturas elevadas. Pueden presentar una gran variedad de geometrías según la posición de los imanes (Figura 9). Además, al no tener escobillas [23], tienen bajas pérdidas, y se caracterizan también por su alta densidad de potencia y eficiencia, sus altos ratios de par/inercia y par/volumen y en los últimos años, también por su fiabilidad. Son los motores dominantes en el sector aeroespacial, y precisamente por esa razón, es el tipo de máquina que se implementa en este proyecto.

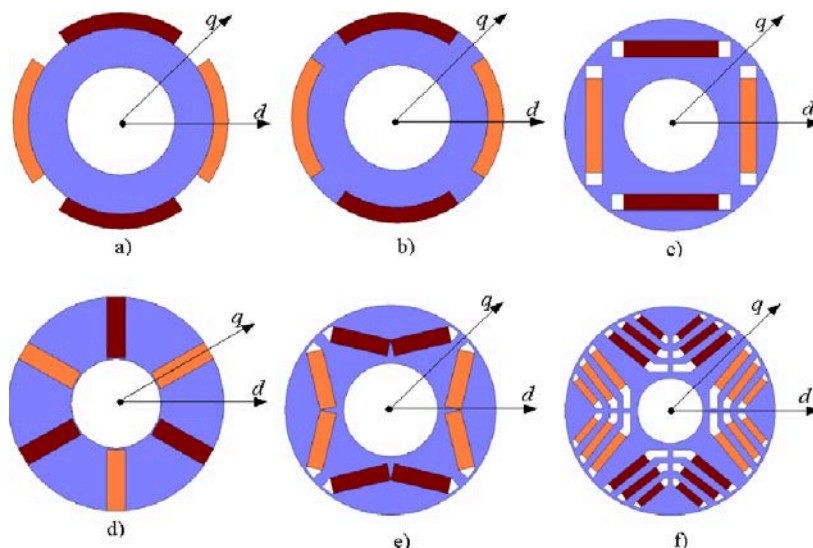


Figura 9: topologías de rotor de imanes permanentes: a) imanes en superficie, b) imanes empotrados en rotor, c) imanes tangenciales enterrados, d) imanes radiales enterrados, e) imanes en V enterrados y f) imanes en V multicapa enterrados. Fuente: [24]

2.2. Motor síncrono de imanes permanentes

Como en este proyecto se dimensionará un motor de imanes permanentes, primero se va a describir más en detalle el principio de funcionamiento de este tipo de motores.

2.2.1. Funcionamiento los motores síncronos de imanes permanentes

El estator y su campo magnético

Como se observa en la Figura 4, estas máquinas pertenecen al grupo de motores cuyo estator se alimenta con corriente alterna. El estator bobinado de estos motores es un electroimán, ya que, al conectarlo a la fuente de alimentación, se generan polos de campo magnético en las bobinas.

El campo magnético generado es de magnitud variable, debido a que la corriente de alimentación es alterna, y el campo magnético es directamente proporcional a la corriente que fluye en el conductor. Además, como generalmente esa corriente es trifásica (Figura 10), se consigue un campo giratorio.

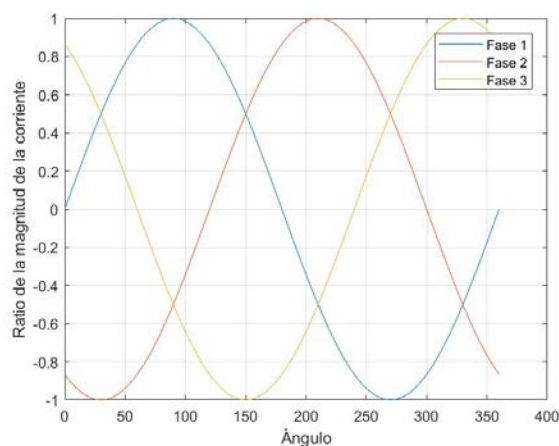


Figura 10: señal trifásica

Para ello, se diseña el devanado del estator de forma que el giro sea lo más uniforme posible. Se muestra un ejemplo simple (tres fases y dos polos) en la Figura 11. Cuando el ángulo es 90° en la se observa que la fase 1 (azul) llega a su valor máximo (Figura 10), por lo que la fase 1' llega a su valor mínimo. Las fases 2 y 3 llegan a la mitad de su valor de pico en dirección contraria, por lo que la 2' y la 3' tienen esa misma magnitud, pero de valor positivo. Como el devanado en este caso tiene el orden 1-2'-3-1'-2-3', los campos magnéticos generados en el estator son los mostrados en la Figura 11a. Se observan las fases 1 y 1' de mayor magnitud en comparación con las demás. En la Figura 11b, se observa el campo magnético resultante del estator en el instante de 90°, cuando la fase 1 es máxima. Por último, la Figura 11c representa los polos generados con el campo magnético rotatorio del estator en ese instante.

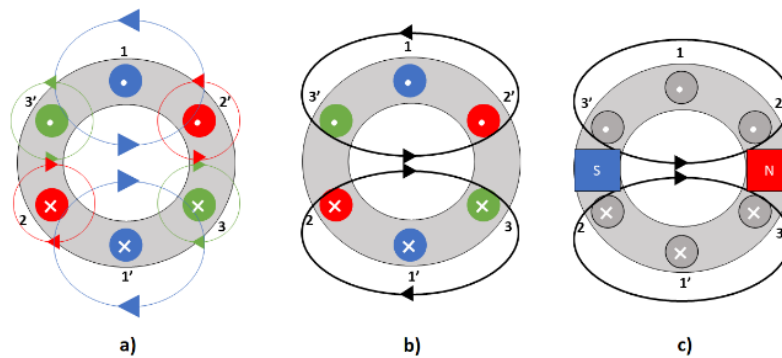


Figura 11: campo magnético (a), su resultante (b) y los polos magnéticos (c) en ángulo 90° . Caso: tres fases y dos polos

Como la corriente es alterna, se sabe que la magnitud de cada fase varía de forma sinusoidal con el tiempo, por lo que cada 120° una de las fases estará en su máximo, y las otras dos en la mitad de su valor de pico. En la Figura 12 están representados los campos magnéticos en los momentos 90, 120 y 150 grados, que es cuando la fase 1 es máxima, la fase 2 es nula, y la fase 3 es más negativa, respectivamente. Se observa claramente que el campo magnético es giratorio. Se aprecia cómo el campo magnético gira según la corriente alterna de alimentación que se muestra en la Figura 10.

Puede configurarse el estátor con un número distinto de polos, fases y bobinas según cuál vaya a ser la función del motor. En este proyecto, la corriente será trifásica, pero el número de polos y ranuras dependerá del diseño, que se hará en el apartado “Diseño electromagnético”.

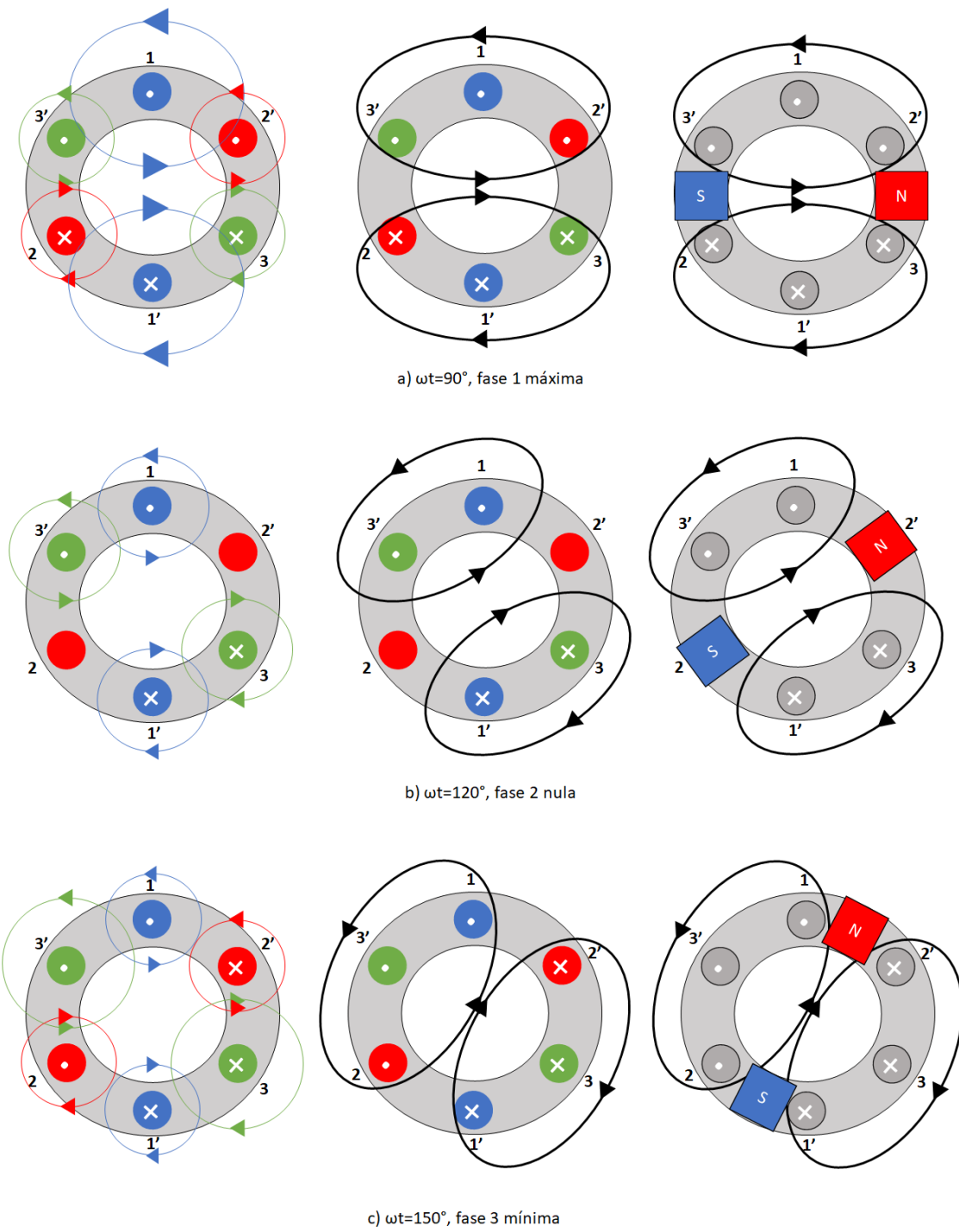


Figura 12: campo magnético, su resultante y los polos magnéticos en a) 90° , b) 120° y c) 150°

El rotor y su campo magnético

La estructura del rotor está hecha de una chapa metálica, de forma que el campo magnético no tenga un gran obstáculo en el rotor, es decir, para evitar tener una gran reluctancia. Para ello, se suele utilizar el hierro por su alta permeabilidad magnética.

La forma de conseguir campo magnético en el rotor de estos motores es, como dice su nombre, con imanes permanentes, con sus respectivos polos norte y sur. Estos imanes pueden estar hechos de materiales naturales como la magnetita, o de materiales artificiales, tales como la ferrita, el neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B), el samario-cobalto u otras aleaciones. Los imanes que se van a implementar en este proyecto son los de neodimio, cuyas propiedades se explicarán en el apartado correspondiente a los imanes permanentes.

El número de polos del rotor se configura de forma que vaya acorde con el número de polos del estator, por lo que el número de imanes utilizados en el rotor depende del diseño del estator. Las siguientes figuras representan dos casos simples: de dos (Figura 13) y cuatro polos (Figura 14).

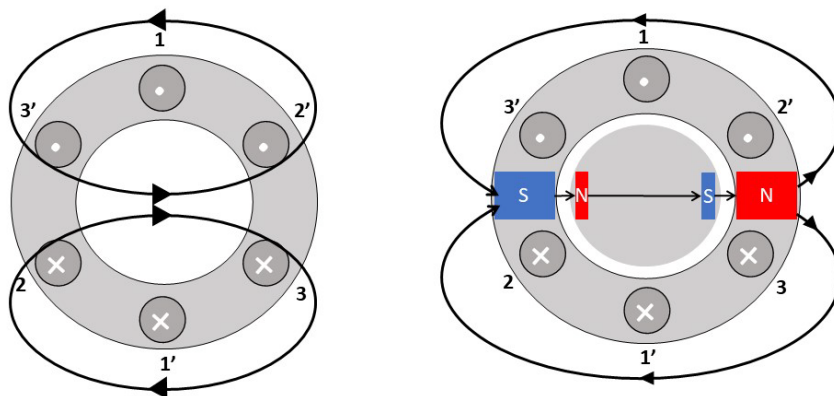


Figura 13: campo magnético resultante y alineación de los polos del rotor y del estator en el caso de 2 polos

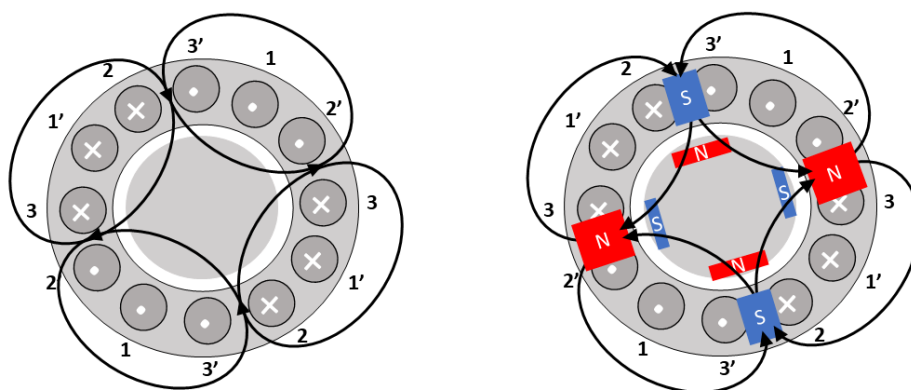


Figura 14: campo magnético resultante y alineación de los polos del rotor y del estator en el caso de 4 polos

2.2.2. Ventajas y desventajas de los motores de imanes permanentes frente a otros motores convencionales

Las ventajas de este tipo de motor, fundamentalmente, las siguientes [23]:

- Como el campo magnético del rotor se genera con imanes permanentes, no hacen falta escobillas ni otros elementos que puedan generar pérdidas por rozamiento. Esto resulta en mayor rendimiento.
- No hay devanado en el rotor, por lo que las pérdidas en el cobre del rotor son nulas. Esto incrementa el rendimiento.
- Tienen alta densidad de potencia y posibilidad de llegar a altos valores en el par.

Respecto a las desventajas, se pueden mencionar las siguientes:

- Dado que el campo magnético lo generan los imanes permanentes, no se puede regular y es necesario buscar formas de controlarlo. Queda un campo remanente en el rotor que impide que se pueda apagar totalmente el motor, y esto supone un inconveniente en términos de seguridad.
- Los imanes permanentes son caros y generalmente provienen de países de oriente (China en particular), donde los materiales son más abundantes. Esto hace que la fabricación del motor, además de ser cara, dependa de las condiciones de dicho país.
- Las tierras raras que componen los imanes permanentes son difíciles de reciclar.

2.3. Últimos avances en motores síncronos de imanes permanentes

Hasta ahora, no se ha conseguido volar un avión regional de forma totalmente eléctrica. Sin embargo, sí se ha conseguido volar aviones híbridos y totalmente eléctricos de menor tamaño y capacidad; además hay un amplio abanico de proyectos de investigación para la propulsión híbrida de aeronaves, entre las cuales destacan varias con financiación europea, proyectos de la compañía Airbus, investigaciones de varias universidades con colaboraciones de empresas, iniciativas de Boeing con colaboración de la NASA, y algunos diseños de la compañía Siemens (SP260D, SP200D y SP2000D), entre otros [15].

El objetivo de estos proyectos es diseñar la propulsión de forma que se sustituya parcial o totalmente la propulsión por combustión. Se está investigando con todo tipo de motores, pero destacan los motores síncronos de imanes permanentes por su alta densidad de potencia. En los próximos párrafos se analizan algunos motores de imanes permanentes desarrollados en los últimos años.

Siemens diseñó en 2015 un motor de imanes permanentes, el SP260D, cuyo par, velocidad de giro, potencia y densidad de potencia son 1000 Nm, 2500 rpm, 260 kW y 5,2 kW/kg, respectivamente [25] [26]. Este motor es el que propulsa el avión acrobático de dos plazas Extra 330LE (Figura 15), al que en 2016 se le otorgó el récord mundial de ascenso para una aeronave de propulsión totalmente eléctrica [27].



Figura 15: avión 100% eléctrico Extra 330LE

Dos años más tarde, en 2017, Siemens diseñó para Airbus el motor de imanes permanentes SP200D, que a pesar de tener una densidad de potencia menor (4,16 kW/kg), tiene un par mayor (1500 Nm) [25]. El avión de Airbus llamado CityAirbus, de cuatro plazas, se propulsa con este motor [28].

En 2017 comenzó el proyecto de Airbus E-Fan X (Figura 16) con colaboración de Siemens y Rolls-Royce, para el que se diseñó el motor de imanes permanentes SP2000D. Sus prestaciones son mejores, con una potencia de 2 MW, un par de 3000 Nm y una potencia específica de 7,7 kW/kg. El proyecto consistía en propulsar un avión híbrido regional con capacidad de más de 50 pasajeros, pero en 2019 se cesó el acuerdo entre las compañías y se canceló el proyecto en abril de 2020. El proyecto europeo HIVOMOT parte de las especificaciones del proyecto cancelado de Airbus, por lo que sus especificaciones son prácticamente idénticas.



Figura 16: avión de pruebas del proyecto E-fan X y de HIVOMOT. Fuente: [12]

En Vancouver, Canadá, en diciembre de 2019 voló por primera vez el avión 100% eléctrico eBeaver (Havilland Canada DHC-2 Beaver para seis pasajeros, ver Figura 17) con el motor Magni500

de MagniX [29]. En mayo 2020 voló en Moses Lake, Washington, el avión comercial 100% eléctrico más grande, un Cessna 208B Grand Caravan (ver Figura 18), también con el motor Magni500 [29]. La densidad de potencia de este motor de imanes permanentes es de 4,2 kW/kg, con una potencia máxima de 560 kW [30].



Figura 17: Havilland Canada DHC-2 Beaver



Figura 18: Cessna Caravan. Fuente: [31]

También se diseñó otro motor de imanes permanentes en la Universidad de Illinois, en Estados Unidos, con la colaboración de la NASA. Su motor proporciona una potencia de 1 MW, una densidad de potencia de 15 kW/kg y una velocidad de giro de 15000 rpm. Las complicaciones de este motor son térmicas debido a las altas corrientes y campos electromagnéticos. Sin embargo, el motor no se ha llegado a probar en aviones, sino únicamente en el laboratorio.

Las características más importantes de los motores descritos se resumen en la Tabla 1: la potencia, la densidad de potencia y la velocidad de giro.

Tabla 1: resumen de las características de los motores de imanes permanentes de los últimos años [26]

Proyecto/avión	Motor	Potencia [kW]	Densidad de potencia [kW/kg]	Velocidad de giro [rpm]	¿Ha volado?
Extra 330LE	SP260D [26][25]	260	5,2	2500	Sí
CityAirbus	SP200D [25]	204	4,16	1300	Sí
E-Fan X	SP2000D [26]	2000	7,7	6500	No
eBeaver y Cessna 208B Grand Caravan	Magni500 [26][30]	560	4,2	1900	Sí
Universidad de Illinois con NASA	[32]	1000	15	15000	No

Se observa en la Tabla 1 que, aunque se hayan conseguido motores de muy altas densidades de potencia, todavía no se han realizado vuelos de prueba con ellos. Además, es importante destacar que no se han comercializado los aviones con motores eléctricos y que todavía esta tecnología debe mejorar para poder aplicarla en vuelos con pasajeros.

2.4. Alcance de la tecnología

Como se ha explicado en el apartado “Últimos avances en motores síncronos de imanes permanentes”, se han conseguido volar aviones de diferentes dimensiones y capacidades con motores eléctricos de imanes permanentes. A medida que han pasado los años, la capacidad de los aviones eléctricos ha aumentado, llegando a los 6 pasajeros del avión eBeaver, con el motor Magni500, de 560 kW y densidad de potencia de 4,2 kW/kg.

En este proyecto de fin de grado, se busca un motor de 2 MW con una densidad de potencia de entre 7,7 y 15 kW/kg [10] con tecnología de imanes permanentes, aunque se sabe que Es un proyecto muy ambicioso teniendo en cuenta que los mejores motores diseñados con esta tecnología y testados en vuelo no superan los 6 kW/kg.

2.5. Imanes permanentes

En este apartado se van a analizar los imanes permanentes, y se profundizará en los imanes con mejores prestaciones, que son los que se utilizarán en el proyecto.

La tecnología de los imanes ha cambiado mucho en los últimos años. Se ha pasado desde los aceros en los años 20 hasta los imanes de neodimio de los últimos años.

Los imanes permanentes se caracterizan según el producto de energía máxima $(BH)_{\text{máx}}$, que indica la densidad de energía que puede generar el imán a su alrededor.

Hasta los años 20, los imanes más potentes y comunes eran aceros o aleaciones con hierro, mientras que en los años 30 lo eran los alnicos (aleaciones de aluminio, níquel y cobalto, como su nombre indica), con una densidad energética de alrededor de 13 MGOe que llega a doblar la de los aceros. [33]

Más tarde se desarrollaron imanes con tierras raras, que son más caros porque los materiales son más escasos, pero tienen una densidad energética mucho mayor, como se observa en la Figura 19. El proceso de obtención de dichas tierras suele ser complejo, porque se encuentran frecuentemente como impurezas en otros compuestos como silicatos, y no están en su estado puro.

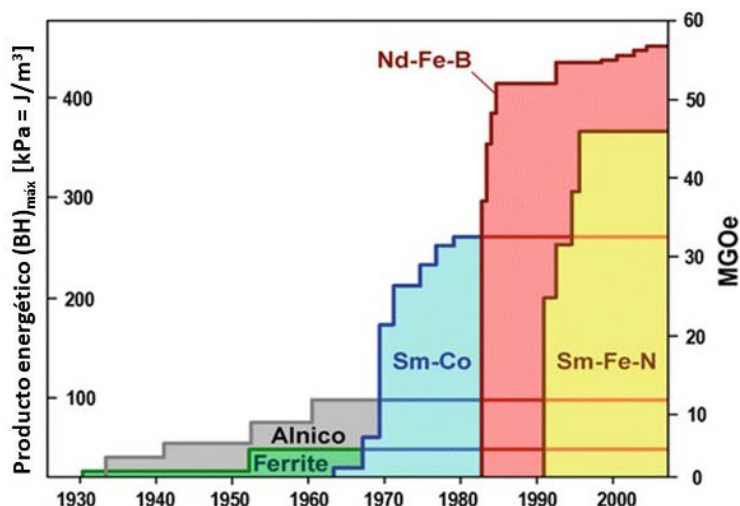


Figura 19: producto de energía de diversos materiales en los últimos 100 años. Fuente: [34]

El samario-cobalto (Sm-Co) es una de las opciones con tierras raras. Estos imanes llegan a productos de energía cercanos a 33 MGOe. Sin embargo, es poco abundante y consecuentemente, muy caro. Además, el cobalto se extrae principalmente del Congo, donde no hay medidas contra la explotación, ni la explotación infantil.

Los imanes de samario-hierro-nitrógeno (Sm-Fe-N) se caracterizan por su alta Temperatura de Curie, la temperatura a la que se pierden las propiedades magnéticas. Tienen una densidad energética alta, pero su gran desventaja es el proceso de obtención del samario (tierra rara) y su precio.

Los imanes de neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B) son los que mayor densidad energética tienen, llegando a valores de hasta 64 MGOe en casos aislados, y permitiendo mayor ligereza. Las reservas de neodimio, una tierra rara, no se consideran tan escasas como las de cobalto, por lo que

el neodimio no es tan caro de obtener. Por eso, los imanes de neodimio son los que tienen mejores prestaciones respecto a su precio. En comparación con los demás imanes de tierras raras, éstos tienen una temperatura de Curie baja, por lo que para mantener sus propiedades magnéticas no pueden llegar a temperaturas más altas que 307-327 °C. [35]

Generalmente, las razones por las que se elige un imán, además de la densidad energética, son la remanencia magnética (fuerza del campo magnético), la coercividad (resistencia a la desmagnetización) y temperatura de Curie. Si la aplicación de ciertos imanes requiere buenas propiedades magnéticas a altas temperaturas, es importante conocer las temperaturas a las que llegará.

Entre las aplicaciones que no necesitan altas densidades de energía, los imanes que dominan en el mercado son los de las aleaciones de ferritas con estroncio o bario. Pero entre las aplicaciones que demandan altas densidades de energía, los más utilizados son los imanes de neodimio-hierro-boro [34], seguidos de los de samario-cobalto.

2.6. Especificaciones de diseño

En la Tabla 2 se muestran las especificaciones para el diseño del motor eléctrico. Estas especificaciones fueron previamente definidas dentro del proyecto HIVOMOT [10] en base a tres criterios:

- La experiencia de los socios que conforman el consorcio.
- Un estado del arte específico realizado bajo el marco del proyecto HIVOMOT.
- La información proporcionada por un consejo asesor externo formado por los principales agentes del sector aeronáutico.

Tabla 2: especificaciones del motor

Parámetro	Valor
Tensión DC de alimentación, $V_{bus,DC}$ [V]	3000
D_{ext} [m]	0,9
Potencia de salida [MW]	2
Velocidad de giro [rpm]	2700
Eficiencia [%]	>95
Frecuencia de conmutación [kHz]	30

Conociendo los datos anteriores, se quiere obtener un motor con las características que se buscaban para el motor tanto del proyecto E-Fan X como para el motor de HIVOMOT.

2.7. Conclusiones

Una vez analizada la tecnología que se implementará en este proyecto, puede concluirse que los motores síncronos de imanes permanentes son la topología de motores más adecuada para el sector de la aviación.

Por otro lado, según la bibliografía, se conoce que los motores de imanes permanentes con una velocidad de giro parecida al motor que se va a diseñar rondan los 5 kW/kg de potencia específica.

3. DISEÑO ELECTROMAGNÉTICO

A continuación, se explica el procedimiento seguido para hacer el diseño electromagnético del motor. Primero se escogerán las combinaciones de pares de polos y ranuras más adecuadas, se diseñará cada una de ellas y se seleccionará el caso que ofrezca las mejores prestaciones.

3.1. Selección de pares de polos y ranuras

En los próximos apartados se explicará el método de elección del número de polos y ranuras del motor.

3.1.1. Rango de pares de polos

Se conoce que los pares de polos dependen de la frecuencia y la velocidad de giro máxima y mínima. La frecuencia de alimentación máxima admitida es de 200 Hz para evitar grandes pérdidas en el hierro por corrientes de Eddy y la mínima es de 8 Hz para que el convertidor DC/AC trabaje correctamente, ya que por debajo de 8 Hz no lo hace.

Teniendo en cuenta estos límites y que la velocidad de giro es de 2700 rpm, se obtienen los valores de pares de polos máximo (4,4) y mínimo (0,17) con la Ecuación 1, para 200 y 8 Hz, respectivamente. Siguiendo ese procedimiento, en principio, el rango de pares de polos a analizar sería {1,2,3,4}. Sin embargo, con esos números, las dimensiones del yugo serían muy grandes y las pérdidas en el hierro muy altas, por lo que la densidad de potencia no sería muy alta. Como el objetivo es optimizar la densidad de potencia, se analizarán los casos de hasta 16 pares de polos, a pesar de que las pérdidas por corrientes de Eddy serán mayores que lo deseado.

Ecuación 1: pares de polos (p) en función de la frecuencia (f) y la velocidad de giro (n). Fuente: [36]

$$p = \frac{60f}{n}$$

En los casos de un par y dos pares de polos las concentraciones que se crearían en algunas zonas serían muy altas y la chapa quedaría saturada. Para evitar este problema habría que aumentar las dimensiones del yugo, lo cual implicaría un aumento de peso. Para algunas aplicaciones en las que el rendimiento es más importante que la densidad de potencia, estos dos casos pueden ser interesantes, pero para la aplicación de este proyecto, es indispensable reducir el peso del motor. Por lo tanto, se eliminan las opciones de un par y dos pares de polos y queda el siguiente rango de pares de polos {4,3,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16}.

Por otro lado, es necesario evitar un par de *cogging* alto. El par de *cogging* es el par necesario para pasar de la posición en la que uno de los imanes del rotor está alineado con un diente del estator a la posición de alineación con el siguiente diente. El número de ranuras del estator es múltiplo de tres porque se alimenta con corriente trifásica, por lo que, si el rotor tuviera el número de pares de polos múltiplo de tres, su posición más natural sería alineando sus imanes con el campo

del hierro de los dientes. Si el número de imanes no es múltiplo del número de fases, ese par será menor. Por eso, se eliminan los pares de polos múltiplos de tres.

En definitiva, los pares de polos a analizar serán {4,5,7,8,10,11,13,14,16}.

3.1.2. Devanado concentrado

A continuación, se analiza el devanado con cada caso de par de polos en el rango elegido en el apartado anterior. El número de ranuras del devanado (Q_s) se elegirá de forma que tenga las siguientes características:

- Será un número múltiplo de tres (número de fases) para evitar desequilibrio de fuerzas.
- El factor de devanado del primer armónico será necesariamente mayor que 0,9.
- El número de ranuras será cercano al número de polos, sin llegar a ser igual, y el número de polos deberá ser menor que el número de ranuras.
- Se busca el mínimo número de periodicidades posible, que sea número par y mayor que la unidad.

3.1.3. Configuración óptima

En la Figura 20 se observan los factores de devanado para devanados concentrados según las combinaciones de polos y ranuras [37].

$Q_s \backslash p$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	0.866		0.866	0.500		0.500	0.866		0.866	0.500		0.500	0.866		0.866	0.500		0.500	0.866	
9	0.617	0.866			0.866	0.617	0.328		0.328	0.617	0.866			0.866	0.617	0.328		0.328	0.617	0.866
12	1		0.866				0.866		...	...		...	...		0.866				0.866	
15			0.621	0.866					0.866	0.621		...	...		...	...		0.621	0.866	
18		1	...	0.647	0.866						0.866	0.647	...	...	...	...		...	...	...
21			...	...		0.866	0.890		0.953	0.953		0.890	0.866		...	...		...	...
24			1	...		0.760	0.866			0.950		0.950			0.866	0.760		...	...
27				...	...	...	...	0.866	0.877	0.915			0.954	0.954		0.915	0.877	0.866	...	...
30				1	...	...	...		0.866	0.874		0.936			0.936		0.874		0.866	
33						...	...		...	0.866		0.903	0.928		0.954	0.954		0.928	0.903	
36					1	...	...		...	...	0.866	0.867				0.953		0.953		
39						...	...		...	...		0.866	0.863		0.918	0.936		0.954	0.954	
42					1	...	...		...	...		...	0.866		0.890	0.913		0.945	0.953	

0.866	$k_{w1} = 0.866, q=1/2, 1/4$		$k_{w1} = 0.945, q=3/8, 3/10$	0.955	$Q_s=21+6k, p=Q_s \pm 1, k = 0, 1, 2 \dots$
	$k_{w1} = 0.902, q=3/7, 3/11$		$k_{w1} = 0.951, q=5/14, 5/16$	0.954	$Q_s=24+6k, p=Q_s \pm 2, k = 0, 1, 2 \dots$
	$k_{w1} = 0.933, q=2/5, 2/7$		not allowed	...	$k_{w1} < 0.866$

Figura 20: factores de devanado para diferentes combinaciones de polos (p) y ranuras (Q_s). Fuente: [37]

De la Figura 20 se extraen los casos con factor de devanado mayor que 0,9 y se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: combinaciones de pares de polos y números de ranuras con factor de devanado mayores a 0,9. Resaltado en verde: casos con periodicidad adecuada (número par mínimo mayor que la unidad)

Pares de polos	Números de ranuras	Factor de devanado	Periodicidad (antiperiodicidad)
4	9	0,945	1
5	9	0,945	1
	12	0,933	1 (2)
7	12	0,933	1 (2)
	15	0,951	1
	18	0,902	1 (2)
8	15	0,951	1
	18	0,945	2
10	18	0,945	2
	21	0,953	1
	24	0,933	2 (4)
11	18	0,902	1 (2)
	21	0,953	1
	24	0,950	1 (2)
	27	0,915	1
13	9	0,945	1
	24	0,950	1 (2)
	27	0,954	1
	30	0,936	1 (2)
	33	0,903	1
14	9	0,945	1
	24	0,933	2
	27	0,954	1
	30	0,951	2
	33	0,928	1
	36	0,902	2 (4)
16	27	0,915	1
	30	0,951	2
	33	0,954	1
	36	0,945	4
	39	0,918	1

Las opciones con periodicidad menor que 2 de la Tabla 3 se eliminan para evitar casos con fuerzas radiales descompensadas [38] y el ruido que pueda causar esto. El resultado se observa en la Tabla 4.

Tabla 4: casos con factor de devanado $>0,9$ y periodicidad >1 y par. Resaltado en verde: casos seleccionados con número de ranuras mayor que número de polos

Pares de polos	Número de ranuras	Factor de devanado	Periodicidad (antiperiodicidad)
8	18	0,945	2
10	18	0,945	2
	24	0,933	2 (4)
14	24	0,933	2
	30	0,951	2
	36	0,902	2 (4)
16	30	0,951	2
	36	0,945	4

Entre los casos de la Tabla 4, se eliminan los casos con más ranuras que polos, lo cual conlleva un par de cogging más alto [39]. Por ello, se evitarán estos casos, quedando únicamente los cinco casos reflejados en la Tabla 5. Se hará el diseño electromagnético de los cinco casos en el siguiente apartado.

Tabla 5: casos con factor de devanado $>0,9$, periodicidad >1 y n° de polos $< Q_s$

Pares de polos	Número de ranuras	Factor de devanado	Periodicidad (antiperiodicidad)	Caso
8	18	0,945	2	1
10	24	0,933	2 (4)	2
14	30	0,951	2	3
	36	0,902	2 (4)	4
16	36	0,945	4	5

3.2. Consideraciones de diseño

En los próximos apartados se explica el procedimiento seguido para cada uno de los casos teóricos óptimos de la Tabla 5. El diseño del primero de los casos (8 pares de polos y 18 ranuras) se explicará más detalladamente y servirá como prediseño para el siguiente de los casos. Para los siguientes, el diseño de cada uno de los casos se hará a partir del diseño precedente al mismo.

Para comenzar el diseño primero se fijan algunos parámetros constantes en todos los casos (Tabla 2), y después se particularizan otros parámetros para encontrar el diseño óptimo de cada uno de los casos.

Las especificaciones geométricas los definen las restricciones del proyecto [10], y son los siguientes: el diámetro exterior máximo del estator (0,9 m) y la longitud del motor (1 m como máximo). Los conductores serán de cobre E G2 R20, la chapa de M235-35A y los imanes serán de neodimio (N48H porque Motor-CAD no permite utilizar imanes N48UH). Los demás valores fijos son la tensión de alimentación DC, la velocidad de giro, la densidad de corriente y el factor de relleno de cobre. Los valores de estos parámetros se muestran en la Tabla 2 previamente presentada.

Se define un valor de 15 A/mm² para la densidad de corriente (relativamente alto para este tipo de motores) porque se supone un sistema de refrigeración mejor que el habitualmente diseñado para este tipo de motores [40]. Dicha refrigeración será capaz de dispersar más calor, por lo que la alta densidad de corriente no debería ser un problema.

El factor de relleno de 0,6 se elige debido a que en estas aplicaciones se usan pletinas o *hairpin* como conductor (obteniendo factores de relleno alrededor de 0,6), pero como el software utilizado no permite su implementación, se utilizan conductores estándares con un factor de relleno de 0,6.

Además, se omitirá el diseño del convertidor DC/AC entre la fuente de energía ($V_{DC,bus}$ de 3000 V) y la toma del motor. Únicamente se tendrá en cuenta la tensión máxima a la salida del convertidor, que es la de la entrada del motor. Será una tensión trifásica equilibrada, cuyo valor rms de línea en el punto nominal será de 1224,75 V, que se calcula con la Ecuación 2.

Ecuación 2: tensión de línea

$$V_{línea,rms} = \frac{V_{bus,DC}}{\sqrt{2} * \sqrt{3}}$$

Partiendo de los datos anteriores, se cuidará que la geometría y en el bobinado sean tales que cumplan con las siguientes condiciones:

- Potencia de salida debe ser de 2 MW
- El rendimiento de la máquina debe ser superior a un 95 %
- La tensión de línea de entrada (o entre fases) requerida por el motor no debe sobrepasar los 1224,75 V calculados previamente con la Ecuación 2
- La chapa debe estar en el punto de saturación (~1,6 T) de flujo magnético para trabajar en el punto óptimo de corriente y flujo magnético, como se observa en la Figura 21

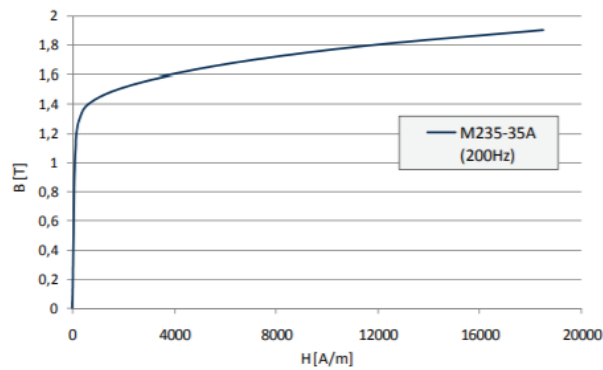


Figura 21: curva BH de M235-35A. Fuente: [41]

Para analizar todo ello, se va a prestar especial atención a los parámetros mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6: parámetros en los que se repara

Estator	Diámetro de entrehierro	m
	Altura del yugo	m
	Ancho del diente	m
	Número de espiras	-
	Densidad de corriente	A/mm2
	Factor de relleno	-
	Geometría de las ranuras	m
Rotor	Altura del yugo	m
	Diámetro interior	m
	Altura de imán	m
	Arco magnético	ED
General	Tensión de línea	V
	Pérdidas	kW

3.3. Estudio de casos

En este apartado se busca un diseño para cada caso que tenga la potencia, densidad de potencia y velocidad de giro deseados, así como la densidad de corriente y tensión de línea requeridas.

3.3.1. Caso 1: 8 pares de polos y 18 ranuras

Para el primero de los casos, se introducen los parámetros fijos definidos anteriormente y a continuación se procede a particularizar el diseño. Se introducen los números de polos y ranuras y se comienza a cambiar los demás parámetros.

Geometría

Se establece el arco magnético en 150 grados eléctricos, por ser un valor estándar, y se juega con la geometría del motor para que el flujo magnético sea cercano al valor de saturación. Las ranuras terminan siendo estrechas porque el flujo magnético es alto y ensanchando el diente el flujo se opone a una resistencia magnética menor. Se cambian los valores de la altura del yugo, de los diámetros del rotor y de la anchura de los dientes. También se varía la distancia en el entrehierro. Se hacen simulaciones hasta minimizar el flujo magnético tanto en el rotor como en los dientes y el yugo del estator, para que la chapa quede saturada. Sin embargo, se obtienen valores de más de 1,9 T, cuando en realidad se desean valores menores, cercanos a 1,6 T. Con la chapa M235-35A no se han podido alcanzar esos valores, por lo que se prueba con Vacoflux. Aunque con este material se obtienen rangos más bajos de flujo magnético, las pérdidas en la chapa son mucho mayores y el rendimiento se reduce notablemente por lo que este material queda descartado.

La geometría final de este boceto se observa en la Figura 22 y la simulación del flujo magnético en la Figura 23.

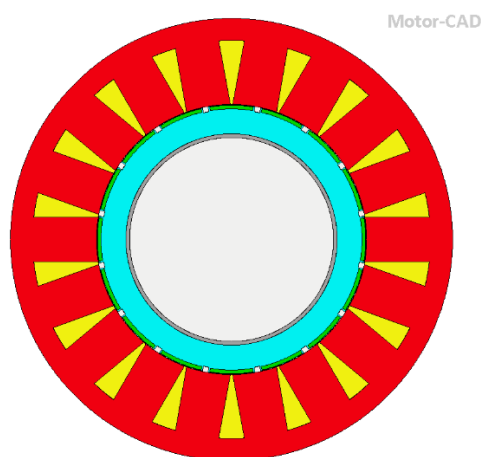


Figura 22: geometría radial del motor preliminar de 8 pares y 18 ranuras

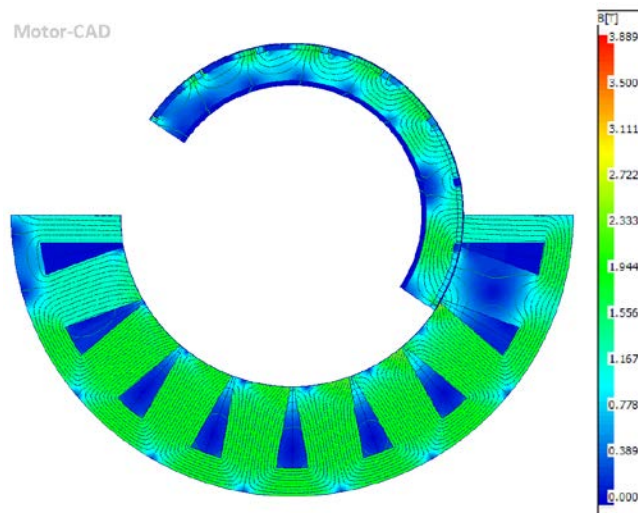


Figura 23: simulación del flujo magnético del motor preliminar de 8 pares y 18 ranuras

Además, por un lado, para evitar que se cierre el campo magnético por debajo de la ranura, se elimina la apertura inferior de la ranura (ver Figura 24). Así, se evita una gran desviación del flujo magnético, como se puede comparar en la Figura 25. Se utilizará esta configuración para todos los casos.

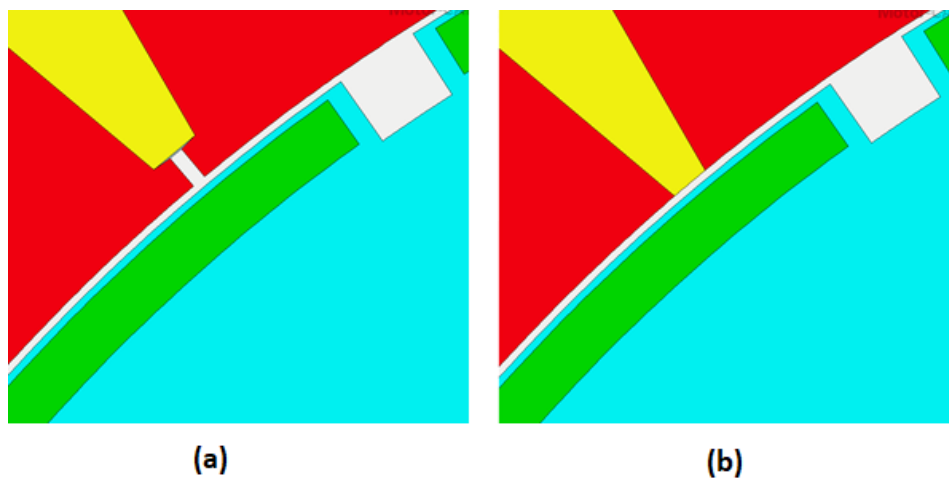


Figura 24: (a) garganta parcialmente abierta y (b) garganta abierta

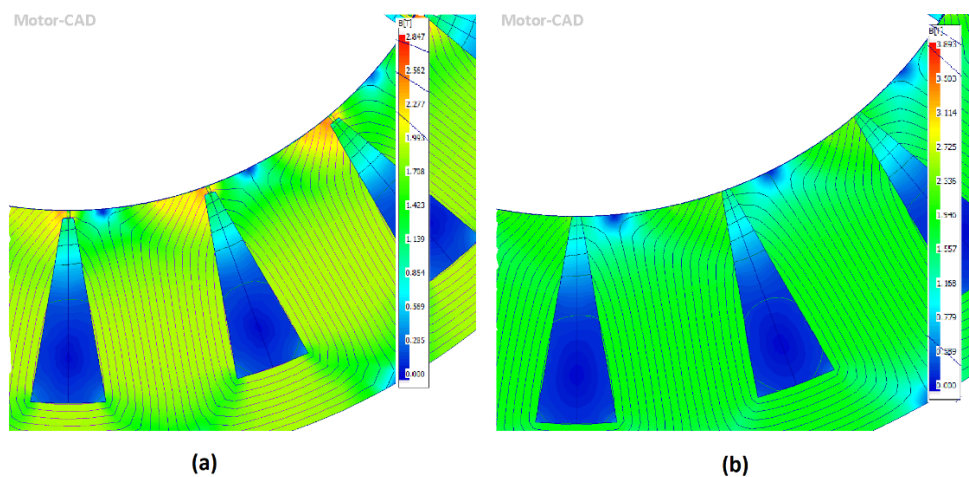


Figura 25: simulación electromagnética (a) con garganta parcialmente abierta y (b) garganta abierta

Por otro lado, se sabe que la inducción es variable y esa variación de la inducción genera corrientes de Eddy (parásitas) en la superficie de los imanes, lo cual se traduce en pérdidas de Joule que se rigen por $P = I^2 * R$. Para proteger los imanes de dicha variación del campo magnético, se colocan dentro de la chapa del rotor (ver Figura 26). Así, como la chapa está laminada, no se generan las corrientes, y, además, se homogeneiza la variación de la inducción que ven los imanes, lo cual se traduce en menos pérdidas.

Hay que mencionar que las pérdidas en los imanes no se ven reflejadas en este diseño, pero hacer esta modificación en la colocación de los imanes mejoraría las pérdidas en los mismos.

Cuanta más chapa tienen los imanes por encima, menos potencia tiene el motor porque baja la tensión inducida y además se satura todavía más el rotor, pero las pérdidas son menores porque las corrientes disminuyen. Por lo tanto, se busca un punto medio en el que la tensión inducida sea suficiente para mantener la potencia alta. Se colocan los imanes con 1 mm de chapa por encima.

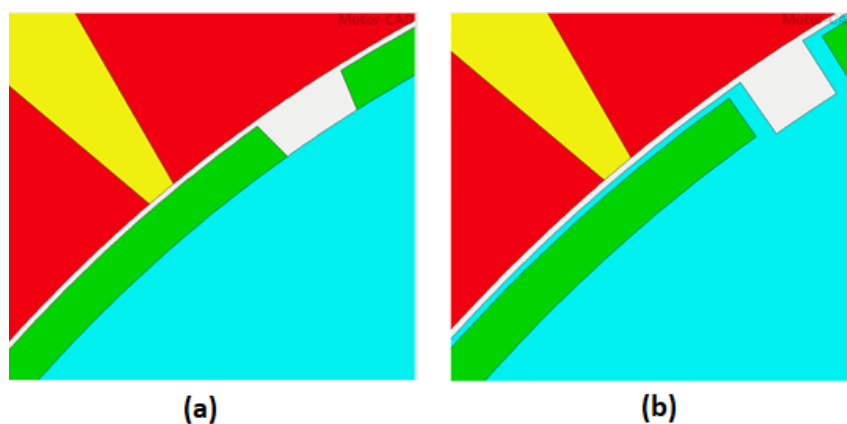


Figura 26: imanes (a) encastrados en la chapa y (b) sin encastrar en la chapa

Las dimensiones finales del motor son un tanto grandes: el diámetro interior del rotor es de 430 mm, y el del entrehierro de 550 mm. Los dientes del estator tienen una anchura de 90 mm y la altura del yugo del estator es de 45 mm.

Devanado

Se diseña un devanado concentrado cuyas ranuras tienen los conductores de dos de las fases. Para terminar de definir el devanado, se selecciona un número de espiras que proporcione la tensión de línea requerida (lo más cercana a 1224,75 V sin sobrepasar el valor). Se hacen varios cambios a lo largo del proceso, y cada vez que cambia la geometría se comprueba que la tensión de fase no supere los 1224,75 V, que el flujo magnético no suba demasiado, y que la potencia esté por encima de los 2 MW.

Se observa que con tres espiras por fase la tensión línea queda notablemente baja (1000 V) y con cuatro espiras por fase la tensión de fase supera el límite (1334,4 V). Por ello, se ponen siete espiras en cada bobina y se ponen las dos bobinas de cada fase en paralelo, ya que son configuraciones equivalentes.

Si se pone el doble de espiras en paralelo, la resistencia y la caída de tensión por fase se quedan igual. Por ello, como se necesita una configuración intermedia. Los casos de 3 y 4 espiras en bobinas en serie son equivalentes a 6 y 8 en paralelo, respectivamente. Y como se ha mencionado antes, ninguna de las dos configuraciones es aceptable, una porque la tensión es demasiado baja y la otra porque supera el límite. Por eso, se colocan 7 en bobinas en paralelo, que proporcionan una tensión de 1162 V, un valor cercano al límite, pero sin superarlo.

Tras las simulaciones se observa que el diámetro de los conductores es de 14,2 mm, pero no entran todas las espiras en la ranura, por lo que se reduce el factor de relleno de cobre a 0,57, que sigue siendo un valor razonable, y así, quedan conductores de 13,84 mm de diámetro.

Peso

En cuanto al peso, en el sector de la aviación es un factor de gran importancia. Por ello, se reduce el peso vaciando el eje y reduciendo la longitud del motor, que inicialmente se define como 1 m (máxima longitud permitida [10]).

Acortar el motor afecta a la potencia de salida y a la tensión de línea, reduciéndolas proporcionalmente, por lo que, si es necesario, se debe combinar eso con aumentar el número de espiras para mantener tanto la potencia de salida como la tensión de línea.

Así, queda un motor de 150 mm de largo (sin tener en cuenta las cabezas de bobina) con un eje de 430 mm de diámetro exterior y 415 mm de diámetro interior. El espesor del eje es un poco pequeño porque se ha intentado reducir el peso quitando material de éste. Sin embargo, para los siguientes casos se definirá un espesor para el eje un poco superior, más realista.

Volumen de imán

El volumen de imán utilizado es el establecido inicialmente, con un arco polar de 150 grados eléctricos y altura de imán de 7,5 mm. Estos dos parámetros se mantendrán constantes para todos los casos.

Resultado preliminar del caso de 8 pares y 18 ranuras

Con dicho volumen de imán se ha obtenido una potencia de salida de 2,0746 MW, una tensión de entrada de 1162 V. Además, con unas pérdidas totales de 84,1 kW se obtiene un rendimiento de 95,94%, que es superior al 95% exigido. Sin embargo, el peso es de 596,01 kg, el cual queda fuera del rango aceptable, entre 130 y 260 kg.

Aunque cumple la condición de la potencia, al superar el peso máximo la densidad de potencia queda en 3,54 kW/kg, que es insuficiente para la aplicación del motor del proyecto HIVOMOT [10]. Los valores de salida del diseño de este motor se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7: parámetros preliminares del motor de 8 pares de polos y 18 ranuras

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia	2,0746	MW
Peso (partes activas)	586,01	kg
Densidad de potencia (partes activas)	3,54	kW/kg
Rendimiento	95,94	%
Longitud de motor (con cabezas de bobina)	210	mm

Corrección del diseño preliminar

El principal problema de este motor se observa en la Figura 23: la chapa está demasiado saturada (llegando a valores por encima de 1,9 T) y esto provoca que las corrientes necesarias sean muy elevadas y las pérdidas más altas de las deseadas; y, además, el peso es muy elevado. Es preciso optimizar tanto el peso como las pérdidas para conseguir un motor válido para el proyecto HIVOMOT.

Geometría

Se empieza cambiando la geometría de *parallel tooth* a *parallel slot*, y así se consigue liberar los dientes del excesivo flujo magnético. La geometría del estator cambia: pasa de tener dientes con los lados paralelos a tener las ranuras con los lados paralelos, como se observa en la Figura 27. Esto,

como se muestra en la Figura 28, permite tener flujos muy inferiores a 1,6 T, y, por tanto, puede reducirse el material.

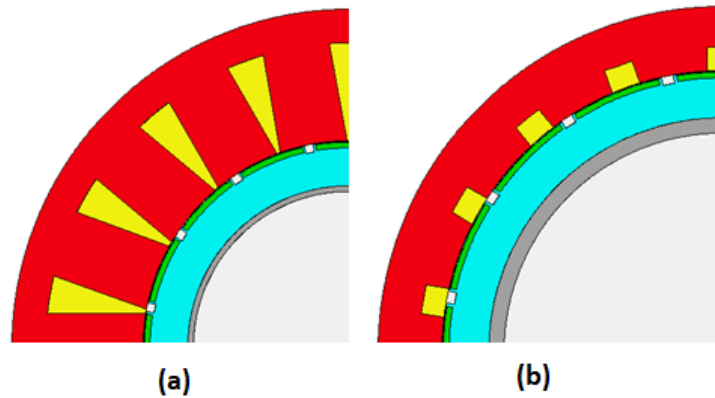


Figura 27: ranuras tipo (a) "parallel tooth" y (b) "parallel slot"

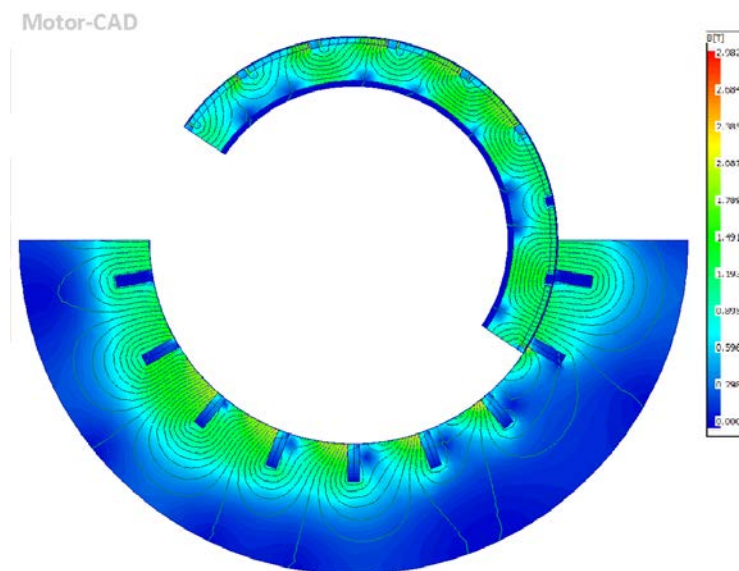


Figura 28: simulación electromagnética del motor preliminar de 8 pares y 18 ranuras cambiando a "parallel slot"

Se mantiene el diámetro exterior en 900 mm, pero se aumenta el interior del estator de 550 a 733 mm. El rotor, por su parte, pasa de tener diámetro interior de 430 mm a 610 mm. Se puede comparar la diferencia de dimensiones entre el diseño preliminar y el final en la Figura 29.

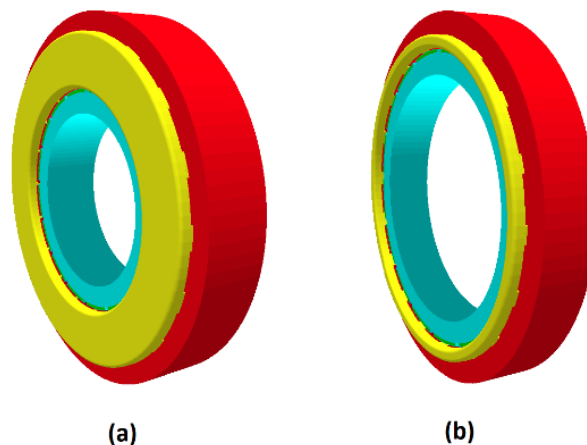


Figura 29: vista 3D del diseño preliminar (a) y diseño final (b) del motor de 8 pares y 18 ranuras

Devanado

Reduciendo las dimensiones interiores (aumentando diámetro de entrehierro y rotor) se consigue reducir el peso, pero es necesario seguir manteniendo la tensión de línea lo más cercana a 1224,75 V sin superarla. Para ello, se restaura el valor original del factor de relleno, 0,6, y se incrementa el número de espiras de 7 a 12 (en cada bobina de los 2 en paralelo) y se va ajustando el ancho y largo de la ranura, hasta quedar una ranura como la de la Figura 30, con 38 mm de ancho y 30 de largo. Así, la tensión de línea queda en 1196 V.

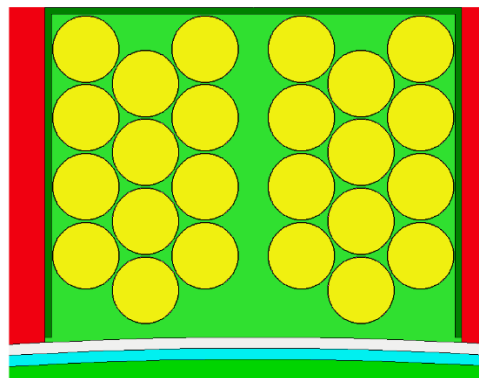


Figura 30: diseño final de las ranuras del motor de 8 pares y 18 ranuras

Peso

Una vez obtenido un diseño que tenga el flujo magnético apropiado (cercano al valor de saturación de 1,6 T), la tensión de entrada adecuada y una potencia de salida mayor que 2 MW, se procede a reducir el largo del motor para disminuir su peso y ajustar la densidad de potencia a los requerimientos del motor. Esto provoca una pequeña bajada en la tensión de línea, pero se observa que sigue siendo suficiente con las 12 espiras.

Resultado del diseño final del caso de 8 pares y 18 ranuras

Con estos cambios se pasa de un motor de 150 mm de largo y 586,01 kg a uno de 122 mm y 326,88 kg. Expresado en densidad de potencia, se consigue un motor de 6,16 kW/kg en lugar de 3,54 kW/kg. Las características más importantes del motor se retratan en la Tabla 8 a continuación.

Tabla 8: parámetros finales del motor de 8 pares de polos y 18 ranuras

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia	2,0146	MW
Peso (partes activas)	326,88	kg
Densidad de potencia (partes activas)	6,16	kW/kg
Rendimiento	98,54	%
Longitud de motor (con cabezas de bobina)	182	mm

Conclusión

Los requerimientos del proyecto indican que la densidad de potencia debe estar entre 7,7 y 15 kW/kg, por lo que se concluye que este motor no es válido para el proyecto HIVOMOT.

3.3.2. Caso 2: 10 pares de polos y 24 ranuras

Una vez obtenido un diseño definitivo para el caso de 8 pares y 18 ranuras, se toma éste como referencia para el diseño del caso de 10 pares y 24 ranuras. Se observa en la Figura 31 que, cambiando los polos y ranuras del diseño de 8 pares y 18 ranuras a 10 pares y 24 ranuras, la chapa queda menos saturada, y eso indica que se pueden reducir las dimensiones.

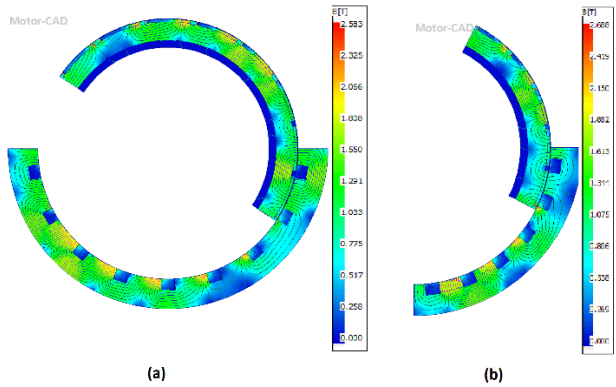


Figura 31: simulaciones electromagnéticas de los motores de 8 pares y 18 ranuras (a) y 10 pares y 24 ranuras (b) con la configuración del motor de 8 pares y 18 ranuras

Se observa en la Figura 31 que se crean concentraciones de inducción en algunas zonas, pero, aunque esto vaya a implicar más pérdidas, se le resta importancia porque no impide que el flujo magnético se reparta bien.

Geometría

Primero se ajustan los diámetros interiores del motor con cuidado de no volver a sobrepasar los límites de flujo magnético. Se aumenta de 733 mm a 752 mm el diámetro interior del estator, y de 610 a 640 mm el diámetro interior del rotor. Al mismo tiempo, se ajustan las dimensiones de las ranuras, y el resultado se observa en la Figura 32.

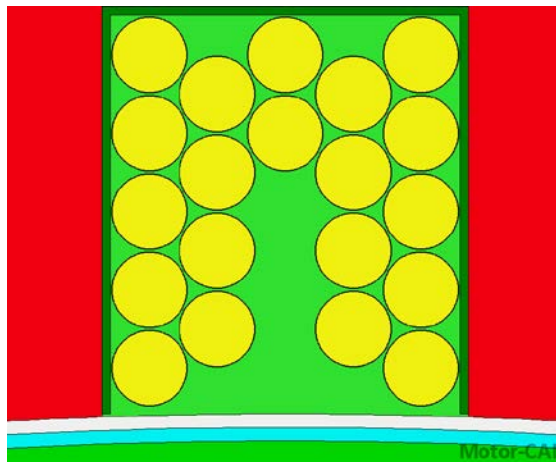


Figura 32: diseño final de las ranuras del motor de 10 pares y 24 ranuras

Devanado

A continuación, se ajusta el número de espiras a 10 (poniendo las bobinas en paralelo) para que la tensión de línea siga estando justo por debajo del valor límite y se vigila que entren todas las espiras en la ranura. Podrían colocarse 5 espiras y las bobinas conectadas en serie, pero por el tamaño de la ranura y la restricción de factor de relleno de 0,6 no es factible. Con esto, se obtiene una potencia de salida mayor que 2 MW y un peso demasiado elevado, así que se procede a reducir la longitud del motor.

Peso y resultado

Se establece una longitud de 124 mm y se vigila que la tensión siga siendo suficientemente alta, ya que al reducir la longitud se reduce la tensión. Como la tensión de línea, de 1223 V, sí es adecuada, se obtiene un motor de las características de la Tabla 9. Tiene una potencia de salida justo por encima de 2 MW y un peso de 298,28 kg, lo cual significa que su densidad de potencia es de 6,75 kW/kg. Además, conociendo que las pérdidas son de 28,38 kW, el rendimiento de la máquina es de 98,6 %, que es superior al exigido.

Tabla 9: parámetros finales del motor de 10 pares de polos y 24 ranuras

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia	2,0146	MW
Peso (partes activas)	298,28	kg
Densidad de potencia (partes activas)	6,75	kW/kg
Rendimiento	98,6	%
Longitud de motor (con cabezas de bobina)	184	mm

Conclusión

Aunque comparando este motor al de 8 pares y 18 ranuras se ha mejorado la densidad de potencia, ésta sigue siendo insuficiente para el proyecto HIVOMOT, y se procede a diseñar el siguiente caso: 14 pares de polos y 30 ranuras.

3.3.3. Caso 3: 14 pares de polos y 30 ranuras

Se coge el diseño de 10 pares de polos y 24 ranuras como base y se cambian el número de polos y ranuras. Consecuentemente, los dientes y el yugo tienen un flujo magnético más bajo, que indica la posibilidad de reducir las dimensiones, y por tanto se podrá aumentar la densidad de potencia.

Geometría

Se aumenta el flujo magnético en el estator hasta estar en el punto de saturación reduciendo las dimensiones del material, y en particular, reduciendo los diámetros y ajustando la longitud y la anchura de las ranuras, cuidando siempre que entren todas las espiras. Así, quedan ranuras de 24 mm de ancho y 28 mm de largo y diámetros de 707 mm para el interior del rotor y de 785 mm para el entrehierro.

Devanado

Se reduce el número de espiras a 8 en paralelo para corregir la tensión inducida, y se ajustan de nuevo las dimensiones de las ranuras. Igual que en el caso anterior, sería equivalente usar 4 espiras en bobinas en serie. La tensión de línea de este caso queda en 1147 V.

Peso y resultado

Finalmente, se reduce la longitud de la máquina hasta obtener una potencia de justo por encima de los 2 MW. Al reducir la longitud, se obtiene un peso de 206,06 kg, y consecuentemente, una densidad de potencia de 9,7 kW/kg. Las pérdidas son de 27,29 kW, que, sobre los 2,0009 MW

de salida, proporcionan un rendimiento de 98,6 %. El resumen de las características de este diseño se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: parámetros finales del motor de 14 pares de polos y 30 ranuras

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia	2,0009	MW
Peso (partes activas)	206,07	kg
Densidad de potencia (partes activas)	9,7	kW/kg
Rendimiento	98,6	%
Longitud de motor (con cabezas de bobina)	170	mm

Conclusión

La densidad de este motor sí es suficiente para el proyecto, pero como se observa que esta propiedad mejora aumentando el número de polos y ranuras, se continúa diseñando para los dos casos restantes.

3.3.4. Caso 4: 14 pares de polos y 36 ranuras

Igual que en los casos anteriores, al aumentar número de ranuras, el estator queda menos saturado, así que se reducen las dimensiones para llevarlo al punto de saturación.

Geometría

Se cambian las dimensiones de las ranuras y los diámetros, tanto el interior del estator como del rotor, y queda un motor como el de la Figura 33. El diámetro exterior del estator es fijo, de 900 mm, el interior es de 793 mm, y el interior del rotor es de 720 mm.

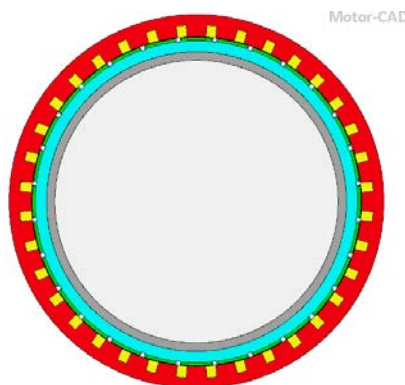


Figura 33: vista radial del motor de 14 pares y 36 ranuras

Además, las ranuras tienen unas dimensiones finales de 24 mm de ancho y 28 mm de largo, y las espiras entran correctamente en su interior manteniendo un factor de relleno de cobre de 0,6.

Devanado

También se vigila que la tensión se mantenga cercana y por debajo de 1224,75 V. Se cambian las 8 espiras en paralelo por 4 en serie, ya que son equivalentes en cuanto a potencia, y entran correctamente en la ranura, como se observa en la Figura 34. La tensión de línea de este caso es de 1106 V.

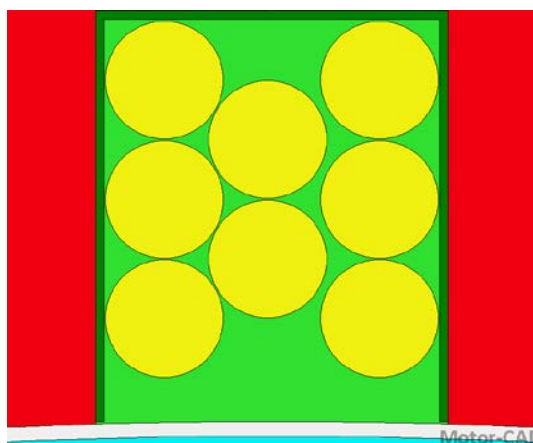


Figura 34: diseño final de las ranuras del motor de 14 pares y 36 ranuras

Peso y resultado

Se reduce la longitud del motor como último paso para ajustar lo máximo posible la potencia y el peso de las partes activas, que se dejan en 2,0101 MW y 179,12 kg, respectivamente, dando una densidad de potencia de 11,22 kW/kg. También se conocen las pérdidas, 25,74 kW, que indican un rendimiento de 98,72%. Se resumen las características del motor de 14 polos y 36 ranuras en la Tabla 11.

Tabla 11: parámetros finales del motor de 14 pares de polos y 36 ranuras

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia	2,0101	MW
Peso (partes activas)	179,12	kg
Densidad de potencia (partes activas)	11,22	kW/kg
Rendimiento	98,72	%
Longitud de motor (con cabezas de bobina)	161	mm

Conclusión

Se observa que la densidad sigue en aumento, en comparación con los motores anteriores. Este motor cumple todas las condiciones del proyecto, pero se va a diseñar el de 16 pares de polos y 36 ranuras, con el objetivo de aumentar la densidad de potencia.

3.3.5. Caso 5: 16 pares de polos y 36 ranuras

Una vez más, se cambia el número de ranuras y polos del caso anterior y se observa el mismo comportamiento: los dientes y el yugo no están saturados. Sin embargo, aunque el flujo magnético inicial es menor que el del caso anterior, el margen para llegar a un estator saturado es pequeño.

Geometría

Se procede a reducir el material aumentando los diámetros interiores, pero solo se consigue aumentar el diámetro interior del rotor en 3 mm, quedando este diseño (ver Figura 35), prácticamente igual al anterior (ver Figura 33).

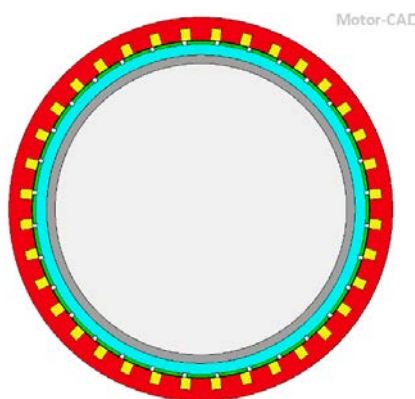


Figura 35: vista radial del motor de 16 pares y 36 ranuras

Devanado

El número de espiras se mantiene igual ya que la tensión sigue siendo correcta (1144 V) con 4 espiras en cada bobina (las dos bobinas de cada fase en serie), y las ranuras se quedan con las mismas dimensiones, ya que así el estator queda saturado y además entran todas las espiras. El diseño de la ranura queda exactamente igual que en el caso de 14 pares y 36 ranuras, que se observa en la Figura 34.

Peso y resultado

Para reducir el peso se procede igual que para los casos anteriores: una vez se consiga la chapa saturada y la tensión requerida, se acorta la longitud de paquete hasta 95 mm. Así, obtiene un motor de potencia de salida 2,0145 MW con un peso de 166,97 kg, que en términos de densidad

de potencia es de 12,06 kW/kg. A pesar de tener unas pérdidas de 26,55 kW, queda un rendimiento muy alto, de 98,68% en concreto.

Tabla 12: parámetros finales del motor de 16 pares de polos y 36 ranuras

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia	2,0145	MW
Peso (partes activas)	166,97	kg
Densidad de potencia (partes activas)	12,06	kW/kg
Rendimiento	98,68	%
Longitud de motor (con cabezas de bobina)	155	mm

Conclusión

Este motor es el que proporciona la densidad de potencia más alta, y se debe a que con más polos y ranuras la chapa del rotor y del estator quedan menos saturados.

En el siguiente apartado se van a comparar los cinco casos estudiados y se seleccionará el más adecuado para esta aplicación.

3.3.6. Comparación de casos y selección

En la Tabla 13 se resumen los cinco casos estudiados, y se observa que todos cumplen la condición de rendimiento y potencia. Sin embargo, no todos tienen la densidad de potencia requerida: los casos 1 y 2 no cumplen con este requisito por su elevado peso. Además, como se ha explicado en la introducción de este apartado, los resultados de estos motores se han calculado sin tener en cuenta las pérdidas en los imanes ni las pérdidas AC en el cobre.

Tabla 13: resumen de los parámetros finales de los casos estudiados

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Potencia [MW]	2,0146	2,0146	2,0009	2,0101	2,0145
Peso (partes activas) [kg]	326,88	298,28	206,07	179,12	166,97
Densidad de potencia (partes activas) [kW/kg]	6,16	6,75	9,7	11,22	12,06
Rendimiento [%]	98,54	98,6	98,6	98,72	98,68
Longitud de motor (con cabezas de bobina) [mm]	182	184	170	161	155

Se observa, también, que el rendimiento de los cinco motores es muy elevado y parecido, por encima del 98,5% en todos los casos.

En la Figura 36 se puede observar que el motor con mejor rendimiento es el cuarto, el de 14 pares y 36 ranuras, con un 98,72%. Sin embargo, es más relevante para esta aplicación que la densidad de potencia sea alta. Especialmente en este punto del diseño, cuando todavía no se ha diseñado la refrigeración, se desea una densidad de potencia alta porque al incluir la refrigeración la densidad de potencia disminuirá. Por lo tanto, el motor de 16 pares y 36 ranuras (caso 5) es el más indicado, con una potencia específica de 12,06 kW/kg. Además, aunque el rendimiento de éste sea un poco menor que el anterior, la diferencia es mínima, de un 0,03%, y como cumple la condición del proyecto, la eficiencia no es un problema.

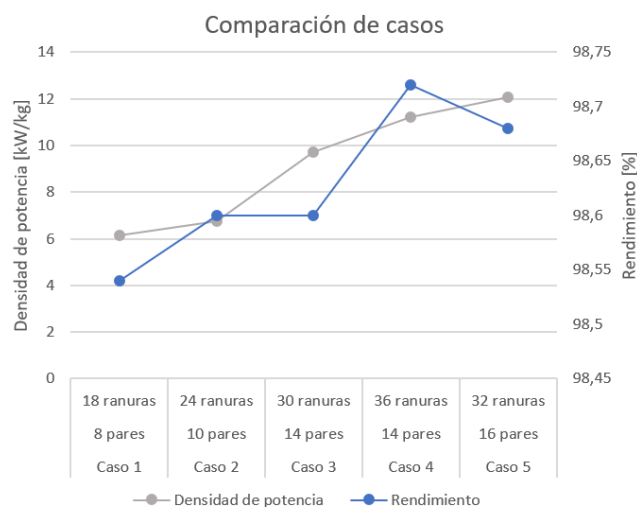


Figura 36: comparación gráfica de densidades de potencia y rendimientos de los casos estudiados

Conclusión

Por ser el motor con mayor densidad de potencia se elige el caso de 16 pares y 36 ranuras para el cual se hará un estudio térmico y se diseñará la refrigeración para dicho motor.

3.4. Simulación transitoria

Hasta el momento se ha simulado con cálculos multi-estáticos, por su rapidez en comparación con la simulación transitoria. Sin embargo, en este tipo de simulaciones Motor-CAD no tiene en cuenta las pérdidas en los imanes ni las pérdidas AC en el cobre. Con las simulaciones transitorias, se obtienen también las pérdidas en imanes y las pérdidas AC en el devanado.

3.4.1. Pérdidas en los imanes

Estas pérdidas son debidas, en parte, a la geometría del estator, ya que, al tener una garganta abierta, en los imanes se producen unas pérdidas mucho mayores.

Como la chapa está laminada, no permite que se generen corrientes por la presencia del campo magnético variable. Sin embargo, los imanes no están laminados, y hay libertad para que fluyan corrientes. Estas corrientes producen pérdidas de Joule cuadráticamente proporcionales a las corrientes y como estas pérdidas provocarían temperaturas muy elevadas, se propone lo siguiente: se van a cambiar los imanes de neodimio por imanes de samario-cobalto, los Recoma 32 en concreto. Estos imanes tienen una temperatura límite más alta y permiten ser laminados, como se observa en la Figura 37.

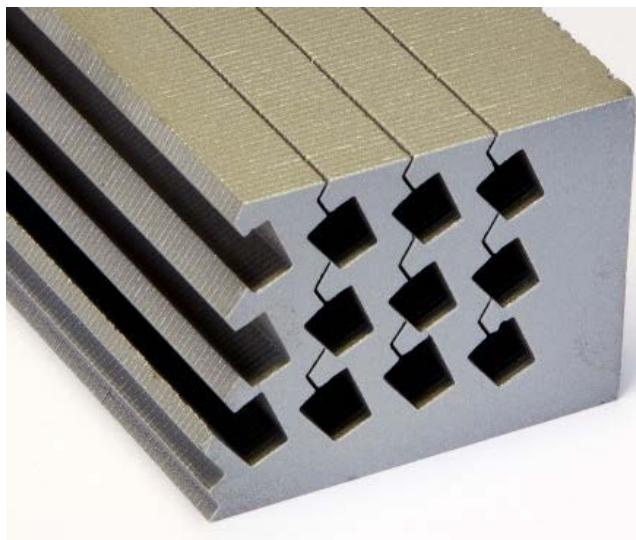


Figura 37: imanes laminados. Fuente: [42]

Laminando los imanes se evita que se creen corrientes en los imanes, y que por lo tanto se consigue que las pérdidas de Eddie sean bajas. Así, se consigue que las pérdidas de los imanes sean prácticamente nulas, y que las temperaturas no sean elevadas.

3.4.2. Pérdidas AC en el devanado

Las pérdidas obtenidas son las producidas por la corriente DC, pero la componente AC de la corriente produce dos tipos de pérdidas.

El primero es el efecto *skin* o pelicular. Este fenómeno se debe a que la corriente alterna crea un campo magnético variable alrededor de los conductores, y este campo, a su vez, crea corrientes dentro del conductor, que se cancelan entre ellas en la parte central del mismo. Así, la corriente resultante solamente circula por la sección exterior del conductor, desaprovechando gran parte del área.

El segundo es el efecto por proximidad, que se genera debido a que los campos magnéticos generados por otros conductores cercanos inhabilitan otra sección del conductor, obteniendo un área útil mucho más pequeña que el área real del conductor.

Esto indica que toda la corriente debe pasar por un área muy pequeña, y como la resistencia es inversamente proporcional al área, la resistencia se multiplica. Esto resulta en unas pérdidas muy altas, que no se han tenido en cuenta en el proyecto. Existen técnicas para reducir las pérdidas AC en el devanado, pero se van a dejar como trabajo a futuro, puesto que requiere un análisis en detalle que no ha podido ser abordado en el marco de este proyecto.

Conclusión

Las pérdidas en los imanes se evitan sustituyendo los imanes de neodimio N48UH por los imanes de samario-cobalto Recoma 32, que permiten ser laminados [42]. En cambio, queda como trabajo pendiente un profundo análisis de las pérdidas AC en el devanado del estator.

4. DISEÑO TÉRMICO

Teniendo en cuenta que la densidad de potencia con la que trabaja el motor es muy elevada, el sistema de refrigeración debe tener una gran capacidad de evacuación de calor. Por eso, con el diseño final del motor de 16 pares y 36 ranuras, se propone el sistema de refrigeración que se explica a continuación.

4.1. Sistema de refrigeración

En esta sección se va a describir el diseño del sistema de refrigeración tras definir las restricciones térmicas que imponen los materiales.

4.1.1. Requerimientos térmicos

En este apartado se van a explicar los requerimientos térmicos del devanado y de los imanes permanentes, que son los que tienen límites de temperatura debido a sus propiedades y aislantes.

Requerimientos térmicos del devanado

La temperatura máxima que podrá alcanzar el cableado viene definida por el aislamiento. En la Tabla 14 pueden analizarse las temperaturas máximas admisibles de las clases de aislantes más utilizados.

En el motor que se ha diseñado en este proyecto, el aislamiento de los conductores del devanado es de tipo H, es decir, que la temperatura máxima a la que pueden someterse es de 180 °C. La refrigeración se diseñará de forma que se cumpla esta restricción para que no se estropee el aislamiento y no se den cortocircuitos u otros accidentes por sobrecalentamientos.

Tabla 14: clases de aislantes térmicos para el devanado. Fuente: [43]

Clase de aislante	Temperatura máxima admisible [°C]
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	>180

Requerimientos térmicos de los imanes permanentes

A la vista de las altas temperaturas que implicarían unos imanes sin laminar, se van a emplear imanes de samario-cobalto presentados en el apartado anterior: los Recoma 32. Estos imanes soportan hasta 200 °C y pueden laminarse hasta 0,5 mm.

Si los imanes se sometieran a temperaturas mayores que 200 °C perderían propiedades y eso implicaría mayores corrientes para conseguir el mismo flujo magnético, como se observa en la Figura 38. En esta figura se puede ver la tendencia que tienen los imanes a desmagnetizarse con la subida de las temperaturas. Esto se traduciría en mayores pérdidas y temperaturas, que a su vez demandarían más corriente, generando así un bucle y estropeando los imanes.

Por todo ello, se va a refrigerar el motor de forma que los imanes no superen los 200 °C.

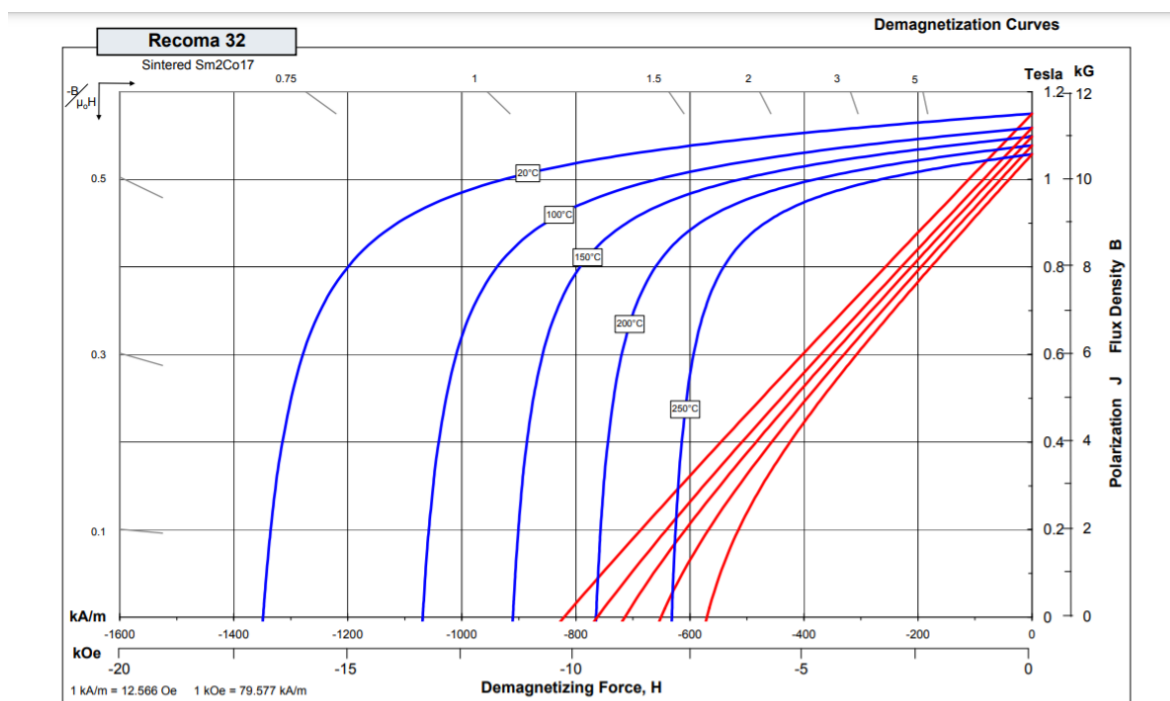


Figura 38: curva de desmagnetización de los imanes Recoma 32 a diferentes temperaturas (líneas rojas). Fuente: [44]

4.1.2. Diseño del sistema de refrigeración

El diseño de la refrigeración se hace simulando para una temperatura inicial de 40 °C para el devanado y de 20 °C para los imanes y la chapa. Estas temperaturas no son realistas porque subirán notablemente cuando se haga el estudio iterativo. Se toman como referencia estos valores para aproximar el sistema de refrigeración de forma que para dicha situación las temperaturas no suban de 180 °C en el devanado y de 200 °C en los imanes. Se seleccionan los siguientes sistemas de refrigeración: inundación del motor o *flooding* y camisa de agua o *water jacket*, con fluidos distintos para cada caso.

En el estudio térmico se vigila que entre la temperatura de entrada y salida del fluido de la camisa de agua no haya una diferencia mayor a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además, el total de pérdidas de carga no debe superar un bar, o aproximadamente 100 kPa.

Se ha visto que para mejorar la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del fluido de la camisa de agua y sea menor que $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, se puede aumentar el tamaño de los conductos de la camisa de agua o se puede subir el caudal del fluido. En cambio, para disminuir las pérdidas de carga, se puede disminuir el caudal del fluido o ajustar más la longitud de la carcasa del motor a la longitud real del motor, disminuyendo la longitud del circuito de la camisa de agua.

El punto medio en el que además de esto se cumple que las temperaturas en los imanes no sobrepasan los $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en el devanado no superen los $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ se encuentra con las características que se explican a continuación.

Es importante comentar que, para inundar el motor, no se utiliza agua como refrigerante porque es una sustancia conductora y en caso de haber imperfecciones en el aislante del devanado, habría riesgo de accidentes. Por lo tanto, aunque no sea tan buen refrigerante como algunas de las soluciones acuosas de Motor-CAD, se utiliza aceite de motor (Mobil Jet Oil), porque no es buen conductor de electricidad y esto no causará problemas. La carcasa para inundar el motor deberá tener una longitud de 180 mm, 25 mm mayor que el total del motor en sí mismo, que es de 155 mm, incluyendo las cabezas de bobina.

Para la camisa de agua es posible utilizar un fluido acuoso porque no interfiere con los aislantes del devanado, por lo que se usa el fluido PGW 50/50. Se trata de una mezcla de propilenglicol y agua a partes iguales. Se concreta un caudal de 50 l/min y una temperatura de entrada de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además, los conductos son de 7 mm de altura y 42 mm de ancho, como se observa en la Figura 39. Esto obliga a tener un diámetro de carcasa ligeramente superior, de 918 mm.

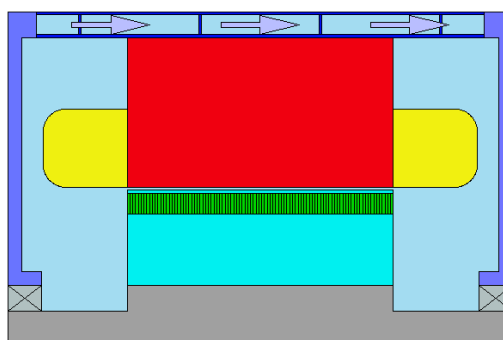


Figura 39: vista axial de la mitad superior del motor refrigerado

Con todo esto, la temperatura máxima en el devanado es de $176,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura media en el devanado de $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la máxima de los imanes es de $65,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los imanes, como se observa en la Figura 40; las demás temperaturas no sobrepasan la del devanado.

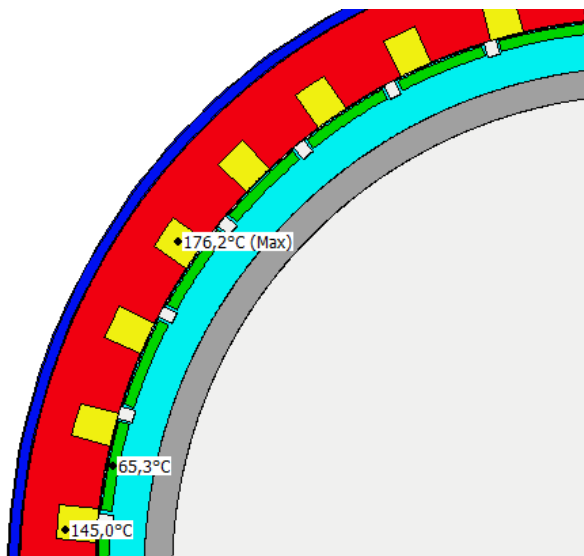


Figura 40: vista radial de temperaturas significativas con el motor refrigerado

Conclusión

Con un caudal de 50 l/min de PGW 50/50 y una inundación en aceite de motor se consigue refrigerar el motor por debajo del límite térmico de 180 °C en el devanado y por debajo de 200 °C en los imanes.

Se sabe que las temperaturas no son realistas en este diseño, ya que los materiales no tienen las mismas propiedades cuando se eleva la temperatura. Por lo tanto, es necesario hacer un estudio iterativo.

4.2. Cálculo acoplado

Este método iterativo realiza un cálculo electromagnético y obtiene unas pérdidas, que se exportan al modelo térmico para obtener unas temperaturas de las partes activas. Estas temperaturas se importan al modelo electromagnético y se recalculan las prestaciones del motor. Se repite el proceso de manera iterativa hasta que los resultados de las dos últimas iteraciones convergen.

Con el diseño electromagnético y térmico hechos, se hace el iterativo y se observan unas temperaturas más altas que las permitidas. Esto indica que el motor a altas temperaturas consume más corriente de la planteada para bajas temperaturas (y para el que se diseña la refrigeración) y por lo tanto produce más calor.

Para refrigerar el motor correctamente es necesario disminuir la densidad de corriente para que el sistema de refrigeración no tenga que disipar tanto calor. Sin embargo, esto lleva a una caída en la potencia, por lo que para mantenerla en 2 MW es preciso aumentar la longitud del motor.

Aunque esto compense la potencia, al aumentar la longitud, aumenta notablemente el peso y también la tensión de línea, que supera el límite.

Para bajar la tensión de línea de entrada del motor se reduce el número de espiras. Al cambiar esto, es posible que no entren correctamente en la ranura manteniendo el factor de relleno de 0,6, por lo que, se hacen pequeñas modificaciones en las dimensiones de las ranuras.

En definitiva, es necesario encontrar un punto medio en el que la densidad de corriente sea suficientemente baja para que el sistema de refrigeración sea capaz de mantener los imanes a menos de 200 °C y el devanado a menos de 180 °C, pero que pueda compensarse con un alargamiento del motor que no implique una subida de peso muy grande.

Haciendo varias simulaciones, se observa que las temperaturas no bajan lo suficiente, por lo que se aumenta el caudal de la camisa de agua a 65 l/min y se ajusta más la longitud de la carcasa a la longitud total del motor. El diámetro exterior de la carcasa se aumenta a 920 mm. A pesar de los cambios, se controla en el diagrama de flujo que las temperaturas de entrada y salida del fluido de la camisa de agua no difieran en más de 10 °C, y que las pérdidas de carga sean inferiores a 100 kPa.

Después, bajando la densidad de corriente a 8,88 A/mm² y subiendo la longitud del motor sin carcasa a 149 mm (a esto se le suman las longitudes de las cabezas de bobina) se consiguen temperaturas más bajas, pero con una tensión de entrada que supera la permitida. Además, para mantener la potencia es necesario aumentar el volumen de imán a 10 mm. También se hacen ajustes en la geometría y el devanado para mantener la chapa en el punto de saturación.

Se reduce de 4 espiras en bobinas en serie a 7 espiras en bobinas en paralelo, consiguiendo que la tensión de línea sea adecuada (1202 V), aunque para mantener la potencia aumente un poco la corriente. Este cambio implica unos ajustes en las ranuras, que serán de 29 mm de ancho y 29 mm de largo; y para ajustar la saturación de la chapa, se modifican ligeramente los diámetros: el del entrehierro queda en 801 mm, el interior del rotor en 735 mm y el interior del eje en 695 mm.

Con estos cambios, se observa en la Figura 41, que las temperaturas máximas en el devanado y en los imanes quedan en 179,1 °C y 57,1 °C, respectivamente, y la temperatura media en el devanado en 143,4 °C.

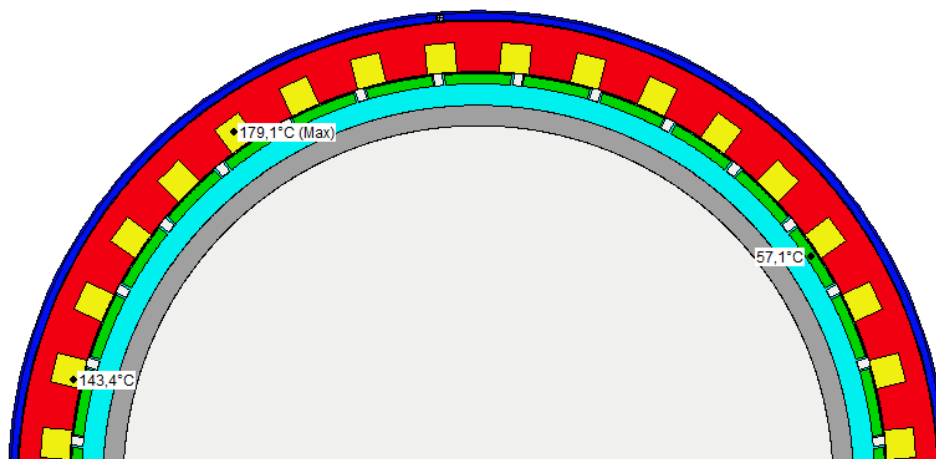


Figura 41: vista axial de las temperaturas significativas del diseño final

Además, se cumple que la diferencia de temperaturas de entrada y salida del fluido de la camisa de agua es menor que 10 °C y que las pérdidas de carga son inferiores a 100 kPa. De hecho, la diferencia de temperaturas es de 5,6 °C y las pérdidas de carga son de 99,91 kPa.

Por último, se comprueba que el motor cumpla con las condiciones de rendimiento, densidad de potencia y potencia. Las pérdidas son de 25,01 kW, la potencia de 2,0004 MW, y el peso total (de la máquina entera) de 332,6 kg, por lo que el rendimiento queda en 98,75% y la densidad de potencia en 6 kW/kg.

Conclusión

Con el método iterativo se han hecho ajustes de forma que en condiciones cercanas a las de funcionamiento las temperaturas no superen los límites que implican los materiales empleados. Ha sido necesario aumentar las dimensiones tanto del motor como de la carcasa, por lo que, al aumentar el peso, la densidad de potencia disminuye y la longitud del motor con carcasa queda en 229 mm. Con una densidad de potencia de 6 kW/kg se da por concluido el diseño del motor.

5. RESULTADOS

Una vez diseñada la refrigeración y corregida la geometría con el método iterativo el peso queda en 332,6 kg. La densidad de potencia, por tanto, es de 6 kW/kg y el rendimiento es de 98,75%. Se observan las características del diseño final en la Tabla 15. Hay que tener en cuenta que el diseño excluye las pérdidas AC en el devanado.

Tabla 15: resultado del motor

Parámetro	Magnitud	Unidades
Potencia	2,0004	MW
Peso (máquina entera)	332,6	kg
Densidad de potencia (máquina entera)	6	kW/kg
Rendimiento	98,75	%
Longitud de motor (con cabezas de bobina)	209	mm
Longitud total de motor (con carcasa)	229	mm

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Por último, se presentan las conclusiones y unas líneas de trabajo a futuro.

6.1. Conclusiones

Se ha observado en el estado del arte que los motores síncronos de imanes permanentes en la aplicación de la propulsión aeronáutica tienen una densidad de potencia cercana a los 5 kW/kg.

Tras hacer los cinco diseños electromagnéticos, se ha observado que con el aumento del número de polos y ranuras la densidad de potencia tiene una tendencia creciente. Como consecuencia, el mejor de los casos es el de más polos y ranuras, de 32 polos y 36 ranuras.

El sistema de refrigeración para este motor consta de dos partes: una camisa de agua de PGW 50/50 y una inundación en aceite de motor. Para que las temperaturas no superen el límite impuesto en las especificaciones de diseño, se ajustan los parámetros geométricos de la carcasa y se concreta un caudal de 65 l/min.

Tras diseñar el sistema de refrigeración se implementa un método iterativo (con cálculos acoplados), con el que se obtiene un motor con una potencia específica de 6 kW/kg.

El proyecto HIVOMOT está centrado en diseñar un motor con características superconductoras por las limitaciones que tienen las tecnologías convencionales. Con las especificaciones del proyecto y la tecnología de los imanes permanentes se llega a un motor de 6 kW/kg y un rendimiento de 98,75%. Si bien este motor no es válido para HIVOMOT, se observa que sin tener en cuenta las pérdidas de AC su densidad de potencia es superior a la de los motores descritos en el estado del arte.

Si se analizan las densidades de potencia de los motores de imanes permanentes de la bibliografía, se observa que compañías que se dedican expresamente a este sector obtienen motores válidos con densidades de potencia cercanas a los 5 kW/kg. Es más, la densidad de potencia de 7,7 kW/kg [10] es la densidad de potencia que se desea superar en el proyecto HIVOMOT con un motor superconductor, así que es lógico que se obtenga un valor inferior con un motor de imanes permanentes.

Se observa que el motor diseñado no cumple todos los requerimientos del proyecto HIVOMOT, debido a que la potencia específica es inferior a 7,7 kW/kg. De todas formas, se concluye que con las especificaciones definidas en HIVOMOT, el límite de los motores síncronos de imanes permanentes para la aviación queda en 6 kW/kg.

6.2. Trabajo a futuro

Este proyecto de fin de grado presenta un diseño de un motor que cumple con los requerimientos definidos en el proyecto HIVOMOT. Aun así, todavía se debería profundizar en diferentes aspectos:

Primero, siguiendo las técnicas existentes, habría que analizar la geometría y la topología de los conductores y su disposición con el fin de minimizar las pérdidas AC en el devanado.

Además, para verificar los resultados y para validar el proyecto sería necesario hacer una simulación en elementos finitos y habría que estudiar la refrigeración de forma más exhaustiva.

Finalmente, para poder llegar a desarrollar un prototipo sería necesario hacer un estudio mecánico, analizar el ruido, las vibraciones, etc.

7. PRESUPUESTO

En esta sección se presenta el presupuesto de este proyecto de fin de grado, distribuido en coste de las licencias de software, del material y de la mano de obra empleados durante todo el proyecto.

En primer lugar, se han utilizado las licencias de Windows 10, Microsoft Office y Motor-CAD (de Ansys), cuyos costes se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16: costes del software

Software	Cuota de adquisición [€]	Tiempo de amortización [año]	Amortización [€/mes]	Tiempo de uso [mes]	Amortización en el proyecto [€]
Windows 10	115	4	2,4	5	12
Microsoft 365	69	1	5,75	5	28,75
Motor-CAD	1500	1	125	4	500
TOTAL [€]					540,75

Estos programas se han utilizado en un ordenador de sobremesa y en un ordenador portátil, cuyas amortizaciones y tiempos de uso se consideran para el presupuesto, y se indican en la Tabla 17.

Tabla 17: costes materiales

Material	Cuota de adquisición [€]	Tiempo de amortización [año]	Amortización mensual [€]	Tiempo de uso [mes]	Amortización en el proyecto [€]
Ordenador portátil	1200	4	25	5	125
Ordenador de sobremesa	1500	4	31,25	5	156,25
TOTAL [€]					281,25

La mano de obra que se emplea en el proyecto es de un ingeniero y una ingeniera en prácticas. Estos costes se resumen en la Tabla 18.

Tabla 18: costes de la mano de obra

	Duración [h]	Precio [€/h]	Total [€]
Ingeniero en prácticas	350	15	5250
Ingeniero	40	50	2000
TOTAL [€]			7250

Teniendo todos los gastos en cuenta, el presupuesto quedaría en 11232,18 € como se observa en la Tabla 19.

Tabla 19: resumen de costes

Partida	Coste [€]
Software	540,75
Material	281,25
Mano de obra	7250
Costes indirectos (15%)	1210,8
TOTAL, SIN IVA	9282,8
TOTAL, CON IVA (21%)	11232,18

8. REFERENCIAS

- [1] O. Wright, "How we made the first flight," *J. Franklin Inst.*, vol. 217, no. 2, pp. 239–254, 1934, doi: 10.1016/S0016-0032(34)91052-8.
- [2] S. Safran, "GE9X Commercial Aircraft Engine," *GE Aviat.*, pp. 1–8, 2021, [Online]. Available: <https://www.geaviation.com/commercial/engines/ge9x-commercial-aircraft-engine>.
- [3] "The GE90 Engine | GE Aviation." <https://www.geaviation.com/commercial/engines/ge90-engine> (accessed May 05, 2021).
- [4] J. Chen, C. Wang, and J. Chen, "Investigation on the selection of electric power system architecture for future more electric aircraft," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 4, no. 2, pp. 563–576, 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2792332.
- [5] "El avión, el medio de transporte que más contamina: 391 gramos por pasajero y por kilómetro." https://www.antena3.com/noticias/economia/avion-contaminacion-video_201908115d4fd6f10cf21cf740a7a227.html (accessed May 12, 2021).
- [6] G. P. Brasseur *et al.*, "European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions," *Atmos. Environ.*, vol. 32, no. 13, pp. 2329–2418, 1998, doi: 10.1016/S1352-2310(97)00486-X.
- [7] BBCNewsMundo, "Cambio climático: ¿cuál es el medio de transporte que más contamina?," pp. 1–13, 2018.
- [8] "Clean Sky 2 Joint Undertaking | Unión Europea." https://europa.eu/european-union/about-eu/agencies/clean-sky2_es (accessed Jun. 03, 2021).
- [9] "¿Qué es Horizonte 2020? / Horizonte2020." <https://eshorizonte2020.es/que-es-horizonte-2020> (accessed Jun. 03, 2021).
- [10] M. Satrustegui, M. Martínez-Iturralde, S. Sanz, G. Sarmietno, A. Lopez, and D. Gandia, "HIVOMOT Requirements report," 2021.
- [11] "HIVOMOT." <https://hivomot.eu/> (accessed May 05, 2021).
- [12] "E-Fan X - Electric flight - Airbus." <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/electric-flight/e-fan-x.html#concept> (accessed May 28, 2021).
- [13] "Ceit BRTA - Ceit - Universidad de Navarra." <https://www.ceit.es/> (accessed Jun. 07, 2021).
- [14] Pd D. Miguel Martínez-Iturralde and Pd D. Ibón Elósegui, "Types of electrical machines and their applications," .
- [15] R. C. Bolam, Y. Vagapov, and A. Anuchin, "A Review of Electrical Motor Topologies for Aircraft Propulsion," *UPEC 2020 - 2020 55th Int. Univ. Power Eng. Conf. Proc.*, 2020, doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209783.
- [16] X. Zhang, C. L. Bowman, T. C. O'Connell, and K. S. Haran, "Large electric machines for

- aircraft electric propulsion,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 12, no. 6, pp. 767–779, 2018, doi: 10.1049/iet-epa.2017.0639.
- [17] W. Cao, B. C. Mecrow, G. J. Atkinson, J. W. Bennett, and D. J. Atkinson, “Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA),” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 9, pp. 3523–3531, 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2165453.
- [18] A. Çelik *et al.*, “Electric Machinery Fundamentals,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2018, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252><http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252>
- [19] Universidad de Oviedo, “Tema VII: La máquina asíncrona.”
- [20] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. 2001.
- [21] J. Bárta and Č. Ondrůšek, “Design and optimization of synchronous reluctance machine,” *Proc. 16th Int. Conf. Mechatronics, Mechatronika 2014*, no. March 2015, pp. 60–64, 2014, doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018236.
- [22] U. Carlos and D. Santos Martín, “Máquinas eléctricas de corriente alterna Capítulo 3 Máquina Síncrona.”
- [23] L. B. Rubio, “Trabajo fin de grado: Diseño electromagnético de un motor síncrono de imanes permanentes para el accionamiento directo de la hélice de un barco,” 2017.
- [24] G. Dajaku and D. Gerling, “Design of Permanent Magnet Machines for Hybrid Vehicles,” 2007. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-Permanent-Magnet-Machines-for-Hybrid-Dajaku-Gerling/9b87a0ffcd5604945acd56c085641cd196b84e07>.
- [25] O. Otto, “Siemens eAircraft Electrifying Propulsion,” 2018, [Online]. Available: https://avinor.no/contentassets/c29b7a7ec1164e5d8f7500f8fef810cc/olaf-otto_siemens_oslo-22-march-2018_without-video.pdf.
- [26] D. Farrakhov and K. Barabanov, “Novel modular design of gearless electric drive for propeller of an all-electric aircraft,” *Proc. - ICOECS 2020 2020 Int. Conf. Electrotech. Complexes Syst.*, 2020, doi: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278467.
- [27] E. Extra and S. Heide, “Avión eléctrico Extra 330LE con motor Siemens de récord mundial,” pp. 1–5, 2021.
- [28] Siemens AG, “Siemens develops propulsion system for the CityAirbus airtaxi,” no. June 2019, pp. 1–12, 2021.
- [29] C. Broda-Bahm, “MagniX electric propulsion systems are already powering aircraft in flight:,” *Resource: Engineering and Technology for Sustainable World*, p. 4, 2018.

- [30] B. Speed, "Magni500 specifications," p. 1.
- [31] R. Mark, "An Electrically Powered Cessna Caravan Continues Progress," pp. 1–6, 2020.
- [32] R. Sanchez *et al.*, "Mechanical Validation of a High Power Density External Cantilevered Rotor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 4, pp. 3208–3216, 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2813336.
- [33] J. F. Herbst and J. J. Croat, "Neodymium-iron-boron permanent magnets," vol. 100, pp. 57–78, 1991.
- [34] R. Skomski, "Permanent Magnets: History, Current Research, and Outlook," in *Novel Functional Magnetic Materials: Fundamentals and Applications*, A. Zhukov, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 359–395.
- [35] M. D. Calin and E. Helerea, "Temperature influence on magnetic characteristics of NdFeB permanent magnets," *2011 7th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2011*, 2011.
- [36] M. Satrústegui, "Análisis de la configuración de devanado," p. 37, 2018.
- [37] F. Libert and J. Soulard, "Investigation on pole-slot combinations for permanent-magnet machines with concentrated windings," *Int. Conf. Electr. Mach. (...)*, no. June, pp. 5–8, 2004, [Online]. Available: http://www.ee.kth.se/php/modules/publications/reports/2004/IR-EE-EME_2004_005.pdf.
- [38] N. Bianchi, S. Bolognani, and M. Dai Pre, "Magnetic loading of fractional slot three phase PM motors with non overlapped coils," *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)*, vol. 1, no. 2, pp. 35–43, 2006, doi: 10.1109/IAS.2006.256517.
- [39] J. Soulard and F. Meier, "Design guidelines and models for PMSMs with non-overlapping concentrated windings," *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 72–83, 2011, doi: 10.1108/03321641111091449.
- [40] J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, *Design of rotating electrical machines*. 2013.
- [41] P. Pišek, B. Štumberger, T. Marčič, and P. Vrtič, "Performance comparison of double and single rotor permanent magnet machine," *Przegld Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 3, pp. 133–136, 2011.
- [42] "Laminated Magnets | Laminated Rare Earth Magnets." <https://www.arnoldmagnetics.com/products/l-type-laminated-magnets/> (accessed Jun. 18, 2021).
- [43] I. E. Commission, I. Protection, and I. Protection, "Grados de Protección IP y Clase de Aislación."
- [44] "Arnold Magnetics." <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Recoma-Combined-160301.pdf> (accessed Jun. 18, 2021).